



**TUGAS AKHIR – ME 141501**

**ANALISA KINERJA *PHASE CHANGE MATERIAL* DENGAN WADAH  
BERBAHAN LOGAM UNTUK *REEFER CONTAINER***

**YUSUF DWI JANARKO  
NRP. 4212100107**

**Dosen Pembimbing :**  
**Sutopo Purwono Fitri, S.T, M.Eng, Ph.D**  
**Taufik Fajar Nugroho, S.T, M.Sc**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017**



## **TUGAS AKHIR – ME 141501**

### **ANALISA KINERJA *PHASE CHANGE MATERIAL* DENGAN WADAH BERBAHAN LOGAM UNTUK *REEFER CONTAINER***

Yusuf Dwi Janarko  
NRP. 4212100107

Dosen Pembimbing :  
Sutopo Purwono Fitri, S.T, M.Eng, Ph.D  
Taufik Fajar Nugroho, S.T, M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017



## **FINAL PROJECT – ME 141501**

### **PERFORMANCE ANALYSIS OF *PHASE CHANGE MATERIAL* WITH METAL PACKAGING FOR *REEFER CONTAINER***

Yusuf Dwi Janarko  
NRP. 4212100107

Advisor :  
Sutopo Purwono Fitri, S.T, M.Eng, Ph.D  
Taufik Fajar Nugroho, S.T, M.Sc

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017

**LEMBAR PENGESAHAN****ANALISA KINERJA *PHASE CHANGE MATERIAL* DENGAN WADAH  
BERBAHAN LOGAM UNTUK *REEFER CONTAINER*****SKRIPSI**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Bidang Studi *Marine Machinery and System* (MMS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Yusuf Dwi Janarko**  
**NRP : 4212100107**

Disetujui oleh Pembimbing Skripsi :

1. Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng, Ph.D  
1975 1006 2002 12 1003
2. Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc  
1976 0310 2000 03 1001



**SURABAYA**  
**JULI 2017**

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA KINERJA *PHASE CHANGE MATERIAL* DENGAN WADAH BERBAHAN LOGAM UNTUK *REEFER CONTAINER*

#### SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Bidang Studi *Marine Machinery and System (MMS)*  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Yusuf Dwi Janarko**  
**NRP : 4212100107**

Disetujui oleh :

Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



**Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T.**  
NIP. 1977 0802 2008 01 1007

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

***Pada laporan skripsi yang saya susun ini tidak terdapat tindakan plagiarisme, dan menyatakan dengan sukarela bahwa semua data, konsep, rancangan, bahan tulisan, dan materi yang ada di laporan tersebut adalah milik Laboratorium Marine Machinery and System (MMS) di Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS yang merupakan hasil studi penelitian dan berhak dipergunakan untuk pelaksanaan kegiatan-kegiatan penelitian lanjut dan pengembangannya.***

Nama : Yusuf Dwi Janarko  
NRP : 4212 100 107  
Judul Skripsi : Analisa Kinerja *Phase Change Material* dengan Wadah  
Berbahan Logam untuk *Reefer Container*  
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS  
Fakultas : Fakultas Teknologi Kelautan

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat tindakan plagiarisme, maka saya akan bertanggung jawab sepenuhnya dan menerima sanksi yang diberikan oleh ITS sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Surabaya, 18 Juli 2017

(Yusuf Dwi Janarko)



*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## **ANALISA KINERJA *PHASE CHANGE MATERIAL* DENGAN WADAH BERBAHAN LOGAM UNTUK *REEFER CONTAINER***

Nama Mahasiswa : Yusuf Dwi Janarko  
NRP : 4212100107  
Dosen Pembimbing I : Sutopo Purwono Fitri, S.T, M.Eng, Ph.D  
Dosen Pembimbing II : Taufik Fajar Nugroho, S.T, M.Sc

### **ABSTRAK**

*Phase Change Material* (PCM) sebagai media penyimpanan energi kalor telah mengalami banyak perkembangan. PCM mampu menyimpan dan melepas kalor dalam jumlah yang besar. Sehingga muncul tren penggunaan PCM pada *reefer container* sebagai penjaga temperatur. Sistem ini disebut dengan sistem refrigerasi *hybrid*. PCM di dalam *reefer container* ikut didinginkan bersama dengan muatan hingga mencapai temperatur tertentu. Proses ini dinamakan proses *charging*. Setelah temperatur yang diinginkan tercapai, refrigerator dimatikan. Setelah itu, PCM bekerja 100% dalam menjaga temperatur di dalam *reefer container*. PCM perlu dibungkus dengan wadah (*packing*) ketika digunakan didalam *reefer container*. Wadah ini sebisa mungkin tidak menghambat proses perpindahan kalor PCM. Selain itu, wadah ini juga harus tahan terhadap korosi karena sebagian besar PCM (organik) memiliki kandungan asam lemak. Selama ini, wadah yang digunakan pada beberapa merek produk PCM yang dikomersialkan dipasaran berbahan polimer *high density polyethylene* (HDPE). Dalam tugas akhir ini dilakukan sebuah percobaan untuk menguji kinerja PCM dengan wadah (*packing*) berbahan logam untuk *reefer container*. Pada percobaan ini dilakukan pengujian dengan tiga jenis material wadah yang berbeda, yakni *stainless steel*, aluminium dan polimer HDPE dalam sebuah *cool box*. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan diperoleh perbandingan kinerja PCM dengan ketiga jenis wadah yang telah ditentukan tersebut.. Pada hasil data percobaan yang diperoleh, *cool box* percobaan aluminium dapat mempertahankan temperature lebih lama dibandingkan percobaan *stainless steel* dan HDPE. Dalam waktu 1 jam udara di dalam *coolbox* percobaan aluminium mengalami kenaikan temperature sebesar 2 °C, sedangkan untuk percobaan *stainless steel* dan HDPE berturut – turut sebesar 5 °C dan 7 °C. Dari hasil percobaan tersebut dapat diketahui bahwa dalam proses mempertahankan temperatur di dalam *cool box*, wadah aluminium memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan wadah *stainless steel* dan HDPE.

**Kata Kunci :** *Phase Change Material*, wadah, logam, *reefer container*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **PERFORMANCE ANALYSIS OF PHASE CHANGE MATERIAL WITH METAL PACKAGING FOR REEFER CONTAINER**

*Student Name* : Yusuf Dwi Janarko  
*Reg. Number* : 4212100107  
*Advisor I* : Sutopo Purwono Fitri, S.T, M.Eng, Ph.D  
*Advisor II* : Taufik Fajar Nugroho, S.T, M.Sc

### **ABSTRACT**

*Phase Change Material (PCM) as a heat energy storage has undergone many developments. PCM is capable of storing and releasing a large amounts of latent heat. So the trend to use the PCM for cooling in reefer container appears. This kind of systeis called hybrid refrigeration. PCM inside the reefer container was cooled together with the cargo until it reaches a certain temperature. This process is called PCM freezing. When the desired temperature reached, the refrigerator is turned off. Then, PCM will work 100% in maintaining the current temperature inside reefer container. PCM needs a packaging when used in reefer container. The packaging would be best to not slows down the heat transfer trough PCM. Besides, this packaging must be resistant to corrosion as most of the PCM's contain corrosive substance. The most recent packaging used for some commercial PCM's product was high density polyethylene (HDPE). In this bachelor thesis, an experiment will be conducted in testing the performance of metal packaging instead of HDPE for reefer container. In this experiment, PCM with three kinds of packaging from different materials (HDPE, stainless steel, Aluminium) will be used for cooling in cool boxes. From this experiment, we can get the difference in performance from the different materials used for PCM's packaging for cooling the cool box. The result shows that coolbox with aluminium packaging can maintain temperature longer than other packaging materials. In an hour, the temperature of air inside coolbox raised 2 °C, as for the stainless steel and HDPE packaging consecutively 5°C and 7 °C. From the data achieved by the experiments, it concludes that alumunium packaging has better performance in maintaining temperature inside coolbox than the other packaging.*

**Key words : Phase Change Material, packaging, metal, reefer container**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa saya curahkan kehadirat Allah SWT karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisa Kinerja Phase Change Material dengan Wadah Berbahan Logam untuk Reefer Container**”.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis mendapatkan banyak bantuan dan motivasi dari berbagai pihak dari awal pengerjaan hingga akhirnya terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segenap hati penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Ibu dan Bapak yang senantiasa memberikan bantuan baik dalam bentuk materi, motivasi, maupun do’a. Saudara dan segenap keluarga yang selalu memberikan dorongan dan do’a hingga terselesaikannya skripsi ini
2. Bapak Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D dan Bapak Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing skripsi. Terima kasih atas bimbingan dan nasehat yang bapak berikan selama pengerjaan skripsi ini
3. Bapak Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing. Terima kasih atas motivasi dan bantuan yang bapak berikan selama kuliah di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan ini
4. Bapak Ir. H. Alam Baheramsyah, M.Sc selaku ketua Laboratorium *Marine Machinery and Systems* (MMS). Terima kasih atas bimbingan dan ilmu yang bapak ajarkan selama masa perkuliahan
5. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu-satu yang telah bersedia menemani saya untuk berdiskusi dan bertukar ide, gagasan dan pemikiran selama pengerjaan skripsi ini.

Akhir kata, penulis telah berusaha semaksimal mungkin dalam penyusunan skripsi ini, namun apa daya layaknya kata pepatah “*tak ada gading yang tak retak*”. Penulis berharap kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Surabaya, 18 Juli 2017

Penulis

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

<b>Lembar Pengesahan.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Lembar Pengesahan.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Surat Pernyataan .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstrak.....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>ix</b>
<b>Kata Pengantar .....</b>	<b>xi</b>
<b>Daftar Isi .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Daftar Gambar .....</b>	<b>xv</b>
<b>Daftar Tabel.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan Penelitian .....	2
1.5. Manfaat Penelitian .....	2
1.6. Tempat Penelitian.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Hybrid Reefer Unit.....	3
2.2. Phase Change Material .....	3
2.2.1. Karakteristik.....	3
2.2.2. Klasifikasi .....	4
2.3. Perpindahan Kalor.....	5
2.3.1. Konduksi .....	5
2.3.2. Konveksi .....	5
2.3.3. Radiasi .....	6
2.4. Polyethylene.....	6
2.5. Stainless Steel .....	6
2.6. Aluminium.....	7
2.7. Penelitian Sebelumnya .....	8
<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN.....</b>	<b>9</b>
3.1. Studi Literatur .....	10
3.2. Studi Empiris .....	10
3.3. Perhitungan Beban Panas .....	10
3.4. Persiapan dan Pembuatan Aparatus .....	10
3.5. Kalibrasi .....	11
3.6. Percobaan.....	11
3.6.1. Alat dan Bahan .....	11
3.6.2. Prosedur Pembuatan Wadah PCM .....	13
3.6.3. Prosedur Percobaan Wadah PCM.....	14



3.7. Pengolahan dan Analisa Data .....	15
3.8. Kesimpulan dan Saran.....	15
<b>BAB IV ANALISA DATA.....</b>	<b>17</b>
4.1. Persiapan Sebelum Percobaan .....	17
4.1.1. Alat dan Bahan untuk Percobaan .....	17
4.1.2. Perhitungan Beban Panas Dinding Coolbox .....	22
4.1.3. Kalibrasi.....	25
4.2. Prosedur Percobaan Cold Storage .....	25
4.2.1. Prosedur Pengoperasian Cold Storage .....	25
4.2.2. Prosedur Konfigurasi Data Logger .....	28
4.2.3. Perangkaian Aparatus .....	33
4.2.4. Jenis dan Variabel Percobaan.....	35
4.3. Data Hasil Percobaan dan Analisa .....	36
4.3.1. Percobaan PCM dengan Wadah Stainless Steel .....	36
4.3.2. Percobaan PCM dengan Wadah Aluminium.....	38
4.3.3. Percobaan PCM dengan Wadah HDPE .....	40
4.3.4. Analisa dan Perhitungan .....	42
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>51</b>
5.1. Kesimpulan .....	51
5.2. Saran.....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>53</b>

## DAFTAR GAMBAR

### BAB II

Gambar 2.1. Klasifikasi <i>Phase Change Material</i> .....	4
--	---

### BAB III

Gambar 3.1. Flow Chart Metodologi Penelitian .....	10
Gambar 3.2. Desain hasil pemotongan plat .....	13
Gambar 3.3. Desain hasil bending potongan plat .....	13
Gambar 3.4. Skema Aparatus Percobaan .....	14

### BAB IV

Gambar 4.1. <i>Coolbox Styrofoam</i> .....	17
Gambar 4.2. <i>Cold storage</i> .....	18
Gambar 4.3. <i>Phase Change Material</i> (PCM) RT – 4 .....	19
Gambar 4.4. Wadah PCM .....	20
Gambar 4.5. <i>Thermocouple</i> tipe K .....	20
Gambar 4.6. <i>Labjack T7 – Pro</i> .....	21
Gambar 4.7. <i>Silicone Sealant</i> .....	22
Gambar 4.8. <i>Sealant Tape</i> .....	22
Gambar 4.9. MCB I <i>Workshop</i> Laboratorium MMS .....	25
Gambar 4.10. MCB <i>Cold Storage</i> .....	26
Gambar 4.11. Langkah Mengatur Temperatur Tujuan .....	27
Gambar 4.12. Langkah Mengatur Diferensial Temperatur .....	27
Gambar 4.13. <i>Thermocouple</i> Terpasang di <i>Labjack</i> .....	28
Gambar 4.14. <i>Labjack</i> Tersambung ke <i>Laptop</i> .....	28
Gambar 4.15. Tampilan Awal pada <i>Kipling</i> .....	29
Gambar 4.16. Tampilan Menu <i>Analog Inputs</i> .....	29
Gambar 4.17. Tampilan Opsi Konfigurasi pada Menu AIN .....	30
Gambar 4.18. Pemilihan Jenis <i>Thermocouple</i> .....	30
Gambar 4.19. Pemilihan <i>Metric</i> Temperatur .....	31
Gambar 4.20. Pemilihan <i>Cold Junction Location</i> .....	31
Gambar 4.21. Tampilan Awal pada <i>LJLogM</i> .....	32
Gambar 4.22. Tampilan <i>LJLogM</i> Setelah Konfigurasi Selesai .....	33
Gambar 4.23. Pemasangan <i>Thermocouple</i> di Permukaan Wadah PCM .....	33
Gambar 4.24. Wadah PCM yang sudah dipasang <i>Thermocouple</i> .....	34
Gambar 4.25. Persiapan <i>Coolbox</i> di Dalam <i>Cold Storage</i> .....	34
Gambar 4.26. Grafik Pendinginan ( <i>Freezing</i> ) Wadah <i>Stainless Steel</i> .....	36
Gambar 4.27. Grafik <i>Cooling</i> PCM Wadah <i>Stainless Steel</i> .....	37
Gambar 4.27. Grafik <i>Freezing</i> PCM Wadah Aluminium .....	38
Gambar 4.28. Grafik <i>Cooling</i> PCM Wadah Aluminium .....	39
Gambar 4.29. Grafik <i>Freezing</i> PCM Wadah HDPE .....	40
Gambar 4.30. Grafik <i>Cooling</i> PCM Wadah HDPE .....	41
Gambar 4.31. Grafik Perbandingan Temperatur PCM pada Setiap Wadah .....	42
Gambar 4.32. Grafik Perbandingan Temperatur Udara di Dalam <i>Cool Box</i> .....	43

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

### BAB II

Tabel 2.1. Komposisi Kimia SS 304.....	7
Tabel 2.2. Komposisi Kimia SS 316.....	7

### BAB III

Tabel 3.1. Alat dan Bahan Percobaan .....	11
---	----

### BAB IV

Tabel 4.1. Dimensi <i>coolbox</i> .....	23
Tabel 4.2. Dimensi Wadah <i>Stainless Steel</i> .....	44
Tabel 4.3. Dimensi Wadah Aluminium .....	46
Tabel 4.4. Dimensi Wadah <i>HDPE</i> .....	49

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pesatnya pertumbuhan industri makanan olahan di Indonesia belum mampu diimbangi pertumbuhan produksi alat pendingin makanan (cold storage). Kapasitas terpasang industri rantai pendingin nasional hanya mampu memenuhi 60 persen dari kebutuhan nasional. Bahan baku untuk sektor industri rantai pendingin 100 persen masih impor. Pemerintah telah mengalokasikan dana sebesar Rp 220 milyar untuk membangun 58 unit cold storage di 22 propinsi sepanjang tahun ini. Selama 5 tahun ke depan pemerintah berencana untuk membangun 280 *cold storage* (Rakyat Merdeka, 2016). Selain itu, diperlukan juga sarana transportasi yang memadai untuk proses distribusi hasil-hasil industri makanan olahan tersebut.

Dewasa ini, penggunaan *hybrid reefer unit* telah banyak dikembangkan. *Hybrid reefer* merupakan sebuah teknologi dimana *reefer* menggunakan dua jenis sumber energi, yakni motor diesel dan motor listrik ([www.truckinginfo.com](http://www.truckinginfo.com), 2016). Pada saat proses bongkar muat *reefer* disambungkan ke power supply untuk menggerakkan motor listrik guna menjalankan sistem refrigerasi pada *reefer* agar temperatur tetap dingin. Pada saat perjalanan, motor diesel disambungkan ke generator untuk menghasilkan energi dalam menjalankan sistem refrigerasi pada *reefer*. Namun, pada sistem ini bahan bakar yang dikonsumsi oleh motor diesel lebih banyak karena harus dibebani dengan generator. Maka dari itu, munculah penggunaan *Phase Change Material* (PCM) untuk mempertahankan temperatur pada *reefer*. Pada sistem hybrid dengan PCM ini, pada saat bongkar muat, *reefer* disambungkan ke *power supply* untuk menjalankan sistem refrigerasi sekaligus charging PCM. Setelah diperjalanan, sistem refrigerasi dimatikan, sementara temperatur dipertahankan oleh PCM. Ketika temperatur didalam *reefer* mulai naik, baru sistem refrigersi dinyalakan kembali. Dengan sistem ini dapat menghemat energi yang diperlukan untuk menjaga temperatur didalam *reefer*.

Phase change material (PCM) perlu di kemas didalam wadah (packing) ketika digunakan pada cold storage maupun *reefer container* untuk mempermudah peletakkan dan menghindari kebocoran. Material dari wadah ini harus tahan korosi dan tidak mengandung zat beracun. Pada beberapa produk PCM yang di komersialkan di pasaran saat ini, wadah yang digunakan berbahan polimer dengan karakteristik anti-korosi dan tak beracun.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan percobaan wadah PCM menggunakan logam dengan daya hantar kalor yang tinggi, tahan terhadap korosi, serta tidak mengandung zat beracun. Dari kriteria tersebut logam yang kemungkinan dapat digunakan ada tembaga (Cu), aluminium (Al), dan nikel (Ni). Dari ketiga jenis logam tersebut akan dipilih yang paling banyak dijumpai di pasaran dan harganya relatif terjangkau. Dengan percobaan ini diharapkan dapat menghasilkan wadah yang handal dan meningkatkan kinerja PCM pada *reefer container*.

## 5.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang muncul dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana kinerja PCM dengan wadah berbahan logam pada cold storage?
- b. Bagaimana perbandingan kinerja antara PCM dengan wadah logam dan wadah polimer seperti yang ada di pasaran?

## 1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terfokuskan, maka perlu diberikan batasan masalah sebagai berikut :

- a. Percobaan dilakukan dengan *Laboratory Scale Cold Storage*

## 1.4. Tujuan Penelitian

Penulisan tugas akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut :

- a. Mengetahui kinerja PCM dengan wadah berbahan logam
- b. Mengetahui keunggulan dan kelemahan wadah PCM berbahan logam dibandingkan dengan bahan polimer.

## 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari percobaan pada tugas akhir ini adalah :

- a. Menghasilkan wadah PCM yang kuat dan handal untuk *reefer container*
- b. Menghasilkan wadah PCM dengan kinerja yang lebih baik dari produk yang sudah ada.

## 1.6. Tempat Penelitian

Tempat yang akan digunakan untuk melakukan percobaan guna memperoleh data pada tugas akhir ini adalah *Laboratorium Marine Fluid Machinery and Systems*, Teknik Sistem Perkapalan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 5.3. Hybrid Reefer Unit

*Hybrid reefer unit* merupakan sebuah *reefer container* yang mampu menggunakan dua sumber energi, yakni diesel dan listrik. Pada saat proses bongkar muat atau *standby*, reefer disambungkan ke sumber listrik untuk menjalankan sistem refrigerasi. Didalam hybrid reefer ini, terdapat generator listrik, generator inilah yang menghasilkan daya untuk komponen-komponen refrigerasi pada reefer. Pada saat perjalanan, motor diesel menggerakkan generator untuk menghasilkan daya guna menjalankan sistem refrigerasi pada reefer. Berbeda dengan reefer konvensional yang sistem refrigerasinya langsung disambungkan ke motor diesel, sistem hybrid ini menggunakan generator dan motor listrik untuk menjalankan sistem refrigerasi.

*Hybrid reefer container* kemudian mengalami perkembangan ketika diawalinya penggunaan *phase change material* untuk pendingin dan *cold storage*. Dengan menggunakan *phase change material*, temperatur di dalam *reefer container* dapat di pertahankan hingga beberapa jam menurut kualitas *phase change material* yang digunakan. Sehingga, pada saat dalam perjalanan sistem pendingin pada *reefer container* dapat dimatikan untuk menghemat biaya operasional yang dikeluarkan. Ketika *reefer container* sedang *standby*, reefer disambungkan ke sumber listrik untuk mendinginkan kembali *phase change material* yang telah kehilangan kalor untuk menjaga temperatur di dalam *reefer container*.

#### 2.2. Phase Change Material

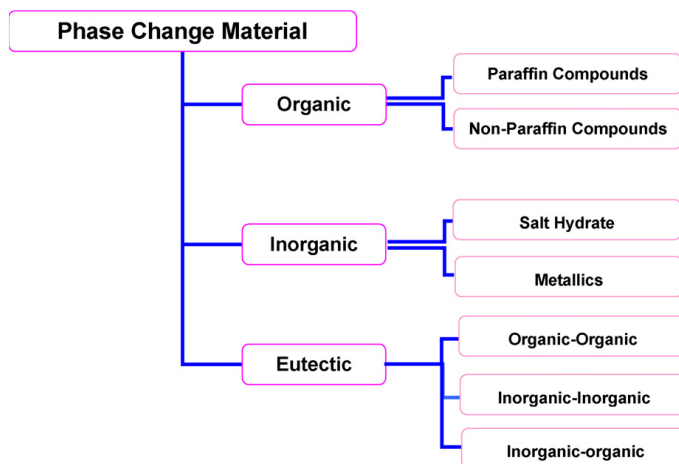
##### 2.2.1. Karakteristik

Perbedaan yang paling penting antara PCM dan media penyimpan panas konvensional seperti air atau batuan adalah bahwa titik leleh PCM berada dalam rentang temperatur kerja. Pada dasarnya, bahkan air adalah PCM dan mungkin itu adalah bahan pertama yang akan digunakan, seperti misalnya untuk pendinginan makanan dengan es. Namun, karena titik lebur air adalah 0 °C, itu tidak dapat digunakan sebagai PCM untuk aplikasi penyimpanan panas di mana kisaran suhu kerjanya di atas 0 °C.

PCM memiliki dua karakteristik utama, yakni densitas penyimpanan panas yang sangat tinggi dan kemampuan menyimpan dan melepaskan panas dalam jumlah yang cukup besar pada temperatur konstan. Hal ini membuat PCM menjadi alternatif yang bagus media penyimpan panas untuk berbagai macam aplikasi. (Hasenöhrl Thomas, 2009)



### 5.3.1. Klasifikasi



**Gambar 2.1. Klasifikasi *Phase Change Material***  
(Sharma A, 2009)

#### a. Organik

Bahan PCM organik terdiri dari parafin dan nonparafin. Bahan organik mencair dan membeku berulang kali tanpa pemisahan fase dan degradasi akibat kalor laten.

##### 1) Parafin

Parafin sebagian besar terdiri dari campuran ikatan alkana  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$ . Kristalisasi dari ikatan  $\text{(CH}_3\text{)-}$  melepaskan sejumlah besar panas laten. Titik cair dan kalor laten fusi meningkat jika ikatan semakin panjang. Parafin memenuhi syarat sebagai media penyimpanan panas karena ketersediaannya di rentang temperatur yang besar. Parafin termasuk material yang aman digunakan, reliable, tidak mahal dan tak berkorosi.

##### 2) Non-parafin

Material organik Non-Paraffin sering disebut juga dengan fatty acids merupakan PCM dengan jumlah variasi paling banyak. Masing – masing material ini memiliki sifat-sifat tersendiri, tidak seperti material paraffin yang rata-rata memiliki sifat yang hampir sama. Jenis material ini adalah material penyimpanan panas yang paling sering digunakan.

#### b. Inorganik

PCM non-organik dapat di klasifikasikan menjadi dua jenis, yakni :

##### 1) *Salt Hydrates*

*Salt Hydrates* memiliki beberapa sifat yang dapat dikategorikan menjadi Phase Change Material yaitu :

- Memiliki kalor laten yang tinggi per satuan volume

- Konduktivitas termal tinggi
- Perubahan volume yang kecil ketika mencair
- Tidak korosif, tingkat racun kecil dan tidak bereaksi dengan plastik.

## 2) Logam

Kategori logam yang dapat dijadikan PCM adalah logam dengan titik leleh yang rendah dan logam eutectics. Bahan logam ini masih jarang dipakai sebagai PCM karena kerugian pada jumlah/berat bahan yang diperlukan. Seperti diketahui, besarnya energi thermal yang bisa disimpan itu berbanding lurus dengan volume. Perbedaan dengan PCM lainnya ialah metallics memiliki konduktivitas termal yang tinggi.

### c. Eutectic

Eutectic merupakan peleburan dari komposisi dua atau lebih komponen, yang masing-masing mencair dan membeku secara kongruen membentuk campuran komponen kristal selama pengkristalan. Eutectic hampir selalu mencair dan membeku tanpa segregasi karena mereka membeku menjadi campuran kristal yang padu, sehingga sedikit peluang untuk terjadinya pemisahan komponen. Disaat mencair, kedua komponen mencair secara bersamaan, pada proses ini pun tidak memungkinkan terjadinya pemisahan antara komponen. (Sharma A, 2009)

## 2.3. Perpindahan Kalor

### 2.3.1. Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan kalor yang terjadi dengan kontak langsung antar permukaan benda. Laju konduksi dipengaruhi oleh konduktivitas termal dan luas permukaan benda. Berdasarkan Hukum Fourier, laju perpindahan panas konduksi dapat ditentukan dengan persamaan :

$$q = -k A \frac{dT}{dx} \quad \dots(1)$$

(Holman,1997)

Dimana laju perpindahan panas  $q$  merupakan hasil perkalian dari konduktivitas termal benda  $k$  dengan luas permukaan benda  $A$  dan gradien perubahan temperatur  $Dt/dx$ .

### 5.3.2. Konveksi

Konveksi merupakan proses perpindahan kalor melalui zat perantara yang disertai dengan perpindahan bagian zat tersebut. Konveksi dibagi menjadi dua, yakni konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi bebas merupakan konveksi yang terjadi tanpa adanya tenaga dari luar. Sedangkan konveksi paksa adalah konveksi yang terjadi dengan dorongan tenaga dari luar. Laju konveksi dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$q = hA ( T_w - T_{\infty} ) \quad \dots(2)$$

(Holman,1997)

Dimana  $q$  adalah laju perpindahan panas,  $h$  adalah koefisien perpindahan kalor konveksi,  $A$  adalah luas penampang benda,  $T_w - T_\infty$  adalah beda temperatur menyeluruh antara dinding dan fluida.

### 5.3.3. Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan panas melalui pancaran atau radiasi elektromagnetik tanpa melalui suatu media. Perpindahan panas ini biasanya menggunakan benda hitam yang memancarkan energy dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat suhu absolute dan berbanding lurus dengan luasan permukaan. Persamaan ini dapat ditulis sebagai rumus berikut :

$$q = \sigma A T^4 \quad \dots(3)$$

(Holman, 1997)

$\sigma$  merupakan konstanta proporsionalitas yang disebut dengan Konstanta Stefan – Boltzman dengan nilai  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ . Konstanta ini hanya berlaku untuk benda berwarna hitam.

### 5.4. Polyethylene

Polietilen termasuk polimer termoplastik yang banyak digunakan tetapi pada aplikasi tertentu dibatasi oleh titik leleh yang rendah, kelarutan dalam hidrokarbon dan cenderung retak ketika pembebanan. Radiasi energi tinggi (seperti sinar-y) digunakan secara luas untuk meningkatkan ikat silang pada polietilen, sedangkan pada polietilen komersial kebanyakan menggunakan radiasi berkas elektron. Penggunaan radiasi energi tinggi untuk ikat silang polimer memerlukan biaya tinggi dan terbatas pada benda dengan penampang lintang tipis. Selain dengan cara radiasi, ikat silang pada polietilen dapat juga ditingkatkan dengan cara konvensional yaitu menggunakan senyawa peroksida. Untuk mendapatkan ikat silang polietilen yang uniform, peroksida harus tersebar merata dalam polimer. Beberapa polietilen terikat silang banyak dijumpai di pasaran. Terutama digunakan dalam pipa, pipa gas (gas piping), pipa air panas (hot-water piping), selang (hose), barang cetakan, industri pembuatan kawat dan kabel.

Polietilen merupakan isolator panas dan listrik yang efektif, akan tetapi masih menunjukkan sifat mekanik rendah. Untuk meningkatkan sifat mekanik, dilakukan pembuatan komposit bermatriks HDPE dengan jenis pengisi tertentu, dengan memperhatikan harga konduktivitas panas tetapi masih bersifat isolator untuk mengurangi panas yang dibangkitkan. (Aloma KK, 2002)

### 5.5. Stainless Steel

*Stainless Steel* (baja tahan karat) merupakan baja yang tahan terhadap pengaruh oksidasi. *Stainless steel* merupakan logam paduan dari beberapa unsur logam yang dipadukan dengan komposisi tertentu. Dari paduan beberapa unsur logam tersebut dihasilkan logam baru yang sifat dan karakteristiknya lebih baik dari logam sebelumnya. Ada banyak jenis *stainless steel* yang dipakai di lapangan, namun yang paling sering digunakan dalam *cold storage* adalah jenis ss 304 dan ss 316.

Berdasarkan ASTM A240, komposisi kimia dari ss 304 dan 316, sebagai berikut:

Tabel 2.1. Komposisi Kimia SS 304

%	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
Min	-	-	-	-	-	-	20	-
Max	0.08	2	0.75	0.04	0.03	20	10	0.1

Tabel 2.2. Komposisi Kimia SS 316

%	C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni	N
Min	-	-	-	-	16	2	10	-
Max	0.08	2	0.45	0.04	18	3	14	0.1

## 5.6. Aluminium

Aluminium merupakan logam non-ferrous yang paling banyak digunakan di dunia, dengan pemakaian tahunan sekitar 24 juta ton. Aluminium dengan densitas 2.7 g/cm<sup>3</sup> sekitar sepertiga dari densitas baja (8.83 g/cm<sup>3</sup>), tembaga (8.93 g/cm<sup>3</sup>), atau kuningan (8.53 g/cm<sup>3</sup>), mempunyai sifat yang unik, yaitu: ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi pada lingkungan luas termasuk udara, air (termasuk air garam), petrokimia, dan beberapa sistem kimia. Pemakaian aluminium dalam dunia industri yang semakin tinggi, menyebabkan pengembangan sifat dan karakteristik aluminium terus menerus ditingkatkan. Aluminium dalam bentuk murni memiliki kekuatan yang rendah dan tidak cukup baik digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan deformasi dan patahan, maka dari itu perlu ditambahkan unsur lain untuk meningkatkan kekuatannya. Aluminium dalam bentuk paduan yang sering dikenal dengan istilah aluminium alloy merupakan jenis aluminium yang digunakan cukup besar saat ini. (Zulaina S, 2010)

Berdasarkan metode peleburannya, paduan aluminium dikelompokkan menjadi dua kelompok utama yaitu paduan tempa (wrought) dan paduan tuang (casting). Jenis paduan aluminium saat ini sangat banyak dan tidak menutup kemungkinan ditemukannya lagi jenis paduan aluminium baru, oleh karena itu dibuatlah sistem penamaan sesuai dengan komposisi dan karakteristik paduan aluminium tersebut untuk memudahkan pengklasifikasiannya.

Berikut beberapa karakteristik yang dimiliki logam aluminium.

- a) Densitas : 2.702 gr /cm<sup>3</sup>
- b) Volume atom : 9.98 cm<sup>3</sup>/mol
- c) Titik lebur : 993.57 K (660.32°C)
- d) Titik didih : 2740 K (2466.85°C)
- e) Kalor spesifik : 0.90 J/Gk

- f) Konduktivitas termal : 237W/Mk
- g) Konduktivitas listrik :  $37.6676 \times 10^6$  S/m

### 5.7. Penelitian Sebelumnya

#### A. *Investigation of the corrosive properties of phase change materials in contact with metals and plastic*

(Maria C. Browne, Ellen Boyd, Sarah J. McCormack. 2016. *Trinity College Dublin. University of Dublin* : Dublin)

Penelitian ini merupakan sebuah percobaan untuk melihat seberapa besar pengaruh dari kontak langsung antara PCM dengan beberapa jenis logam diantaranya *stainless steel*, *aluminium*, *copper* (tembaga), dan *brass* (kuningan). Penelitian ini dilakukan dengan cara menuangkan PCM ke dalam kotak dengan dimensi 50 mm x 14 mm x 2 mm yang terbuat dari keempat jenis material yang telah ditentukan. Kemudian kotak yang berisi PCM tersebut dibiarkan dan diamati selama 722 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material logam yang memiliki kemampuan menahan korosi paling baik adalah *stainless steel*. Pada penelitian ini mengatakan bahwa *stainless steel* bias digunakan untuk semua jenis PCM. Kemudian pada urutan kedua adalah *aluminium* yang hanya cocok digunakan untuk PCM jenis *fatty acid* dengan laju korosi sebesar 12.4 mg/cm<sup>2</sup>tahun. Selanjutnya adalah tembaga dan kuningan yang juga memiliki kemungkinan untuk digunakan pada PCM jenis *fatty acid* dengan laju korosi berturut – turut sebesar 22.15g/cm<sup>2</sup>tahun dan 1.67 g/cm<sup>2</sup> tahun.

#### B. *Phase Change Material for the Thermal Protection of Ice Cream During Storage and Transportation*

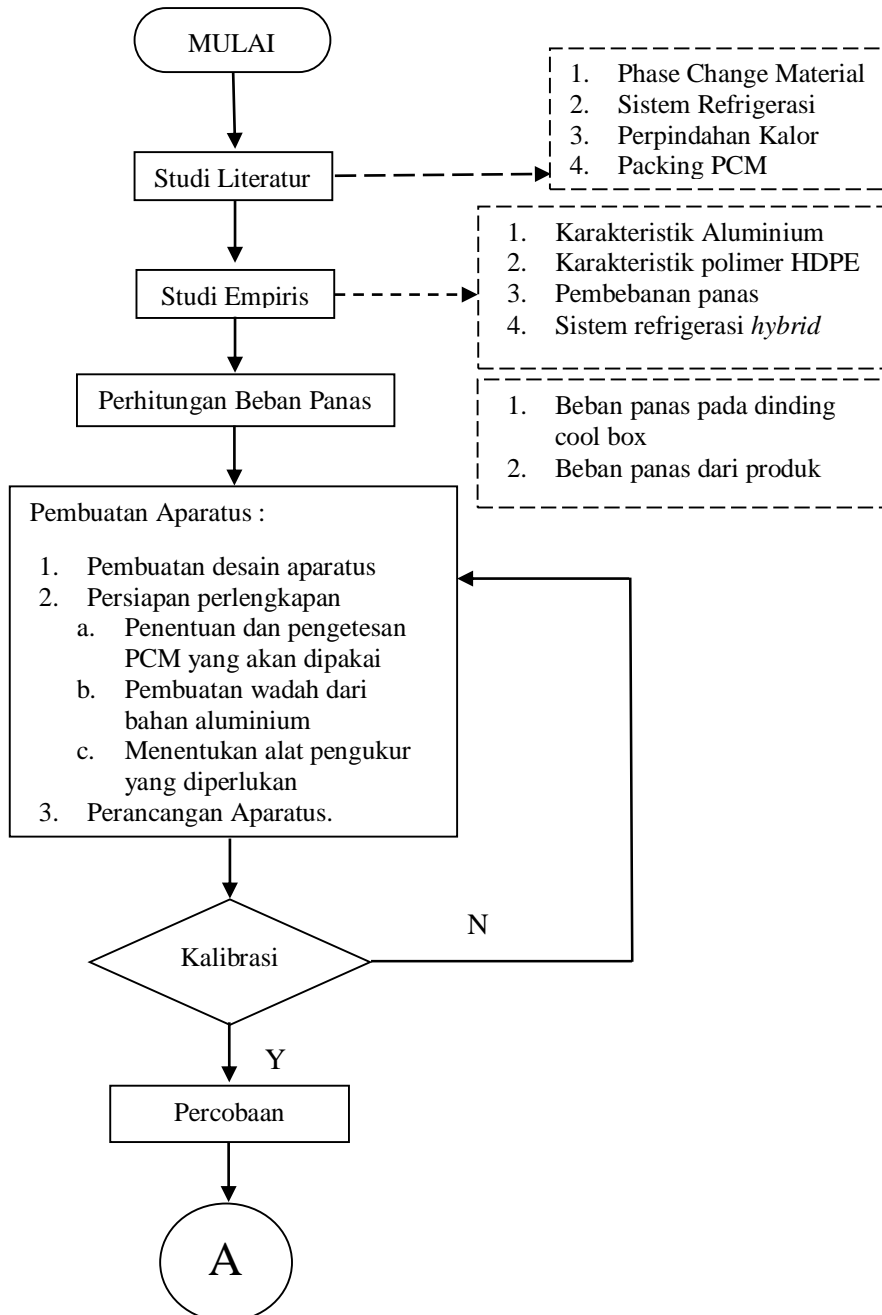
(Leducq, D., et al. 2014. *Refrigeration Process Engineering. Irstea. France*)

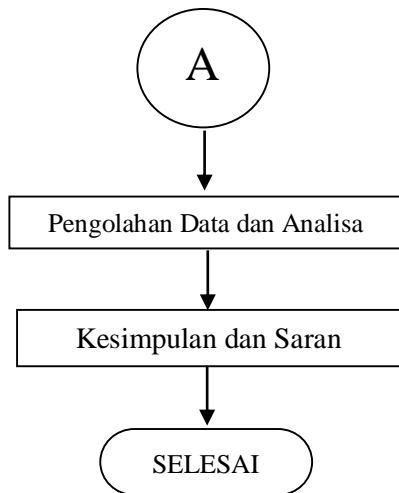
Dalam jurnal ini dilakukan penelitian tentang penggunaan *phase change material* dalam *packaging* (wadah) HDPE sebagai alternatif pada insulasi *cold storage* untuk es krim. Pada penelitian tersebut dilakukan sebuah eksperimen untuk mengetahui kinerja dari *phase change material* sebagai bahan insulasi dengan melakukan perbandingan menggunakan *cool box* berbahan karton. Dalam eksperimen ini dilakukan percobaan ini di sediakan 3 *cool box* dari bahan karton yang diberi insulasi berbeda, yakni tanpa insulasi tambahan, *polystyrene*, dan dengan *phase change material*. Dari hasil percobaan dapat diketahui bahwa *cool box* dengan insulasi *phase shange material* dapat menjaga temperatur es krim menjadi lebih stabil daripada *polystyrene*. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa material dengan kapasitas panas yang besar memiliki kinerja yang lebih baik dalam menjaga perubahan temperatur dibandingkan material dengan konduktivitas yang rendah.

### BAB III

#### METODELOGI PENELITIAN

Proses penyelesaian masalah pada tugas akhir ini adalah secara eksperimental. Eksperimen yang akan dilaksanakan adalah melakukan sebuah percobaan di laboratorium menggunakan salah satu produk PCM , yakni RT-4. Berikut *flow chart* langkah – langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini.





Gambar 3.1. Flow Chart Metodologi Penelitian

### 3.1. Studi Literatur

Pada tahapan ini, penulis akan mempelajari berbagai macam literatur yang berhubungan dengan tugas akhir. Pada tahap ini penulis melakukan studi dengan mengumpulkan jurnal, buku, maupun artikel yang berhubungan dengan topik penelitian yang dilakukan. Dari studi yang dilakukan penulis memperoleh informasi tentang material food grade, material food grade pada kemasan makanan, jenis material kaleng makanan, technical data PCM RT4-RT8, sistem refrigerasi hybrid, karakteristik dan jenis – jenis PCM.

### 3.2. Studi Empiris

Pada tahapan ini dilakukan studi mengenai karakteristik material yang akan digunakan sebagai *packing* untuk PCM. Untuk memperoleh informasi yang valid mengenai material *packing* PCM dilakukan survei ke industri *cold storage* di sekitar Surabaya. Dari hasil survei ini, penulis memperoleh beberapa data penting antara lain jenis material *packing* yang dipakai di *reefer container*, material logam yang berpotensi untuk dijadikan *packing* PCM, dan kriteria yang harus diperhatikan dalam pemilihan material *packing* untuk PCM. Tahapan ini juga mencakup perhitungan awal pembebanan panas dan proses perancangan desain sistem untuk percobaan.

### 3.3. Perhitungan Beban Panas

Pada tahapan ini akan dilakukan perhitungan beban panas yang ada pada sistem yang digunakan untuk percobaan. Beban panas yang dihitung adalah beban panas *cool box* dan beban panas wadah PCM.

### 3.4. Persiapan dan Pembuatan Aparatus

Pada tahapan ini akan dipersiapkan alat dan bahan yang diperlukan untuk pembuatan aparatus berupa sistem pendingin. Sistem pendingin yang dirancang hampir sama, yakni menggunakan sistem hybrid dengan PCM. Perbedaannya

hanya terdapat pada jenis packing PCM yang digunakan. Diharapkan pada percobaan diperoleh data mengenai perbedaan kinerja dari penggunaan kedua packing yang berbeda ini. Alat dan bahan yang perlu dipersiapkan adalah sebagai berikut :

a. Wadah PCM Logam & polimer HDPE

Packing yang akan digunakan pada percobaan adalah packing dengan bahan logam dan bahan polimer HDPE. Masing-masing jenis packing akan dipersiapkan sebanyak 4 buah. Jenis logam yang dipakai adalah stainless 304 dan aluminium.

b. PCM

Jenis PCM yang dipakai menyesuaikan dengan kebutuhan temperatur dan beban panas yang telah dihitung.

c. Thermocouple

*Thermocouple* digunakan sebagai alat ukur untuk membaca penurunan dan kenaikan 11 temperature didalam *cool box*.

d. Labjack T7 (Data Logger)

Alat ini dipakai untuk membaca data pada saat percobaan, yakni temperatur.

### 3.5. Kalibrasi


Pada tahapan ini dilakukan uji coba pada apparatus yang telah dirancang. Semua peralatan dirangkai dan dilakukan pengujian awal untuk mengetahui apakah sistem dapat bekerja dengan benar atau tidak. Apabila sistem telah bekerja dengan benar, maka kegiatan dilanjutkan ke tahap percobaan. Namun, apabila sistem tidak bekerja maka harus mengulang kembali di tahap pembuatan apparatus.

### 3.6. Percobaan

#### 3.6.1. Alat dan Bahan

Pada percobaan ini diperlukan beberapa peralatan untuk menunjang proses berlangsungnya percobaan yang akan dilakukan. Berikut peralatan dan bahan yang diperlukan.

Tabel 3.1. Alat dan Bahan

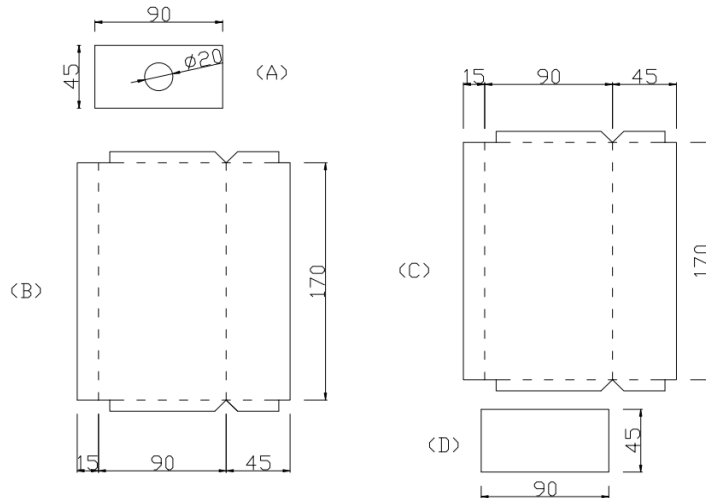
No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Keterangan
1.	Wadah HDPE		Wadah dari bahan HDPE dengan dimensi 170 mm x 90 mm x 45 mm



2.	Wadah Aluminium		Wadah terbuat dari material aluminium dengan dimensi 170 mm x 90 mm x 45 mm
3.	Wadah Stainless		Wadah terbuat dari material stainless 304 dengan dimensi 170 mm x 90 mm x 45 mm
4.	Gelas ukur		Digunakan untuk mengukur jumlah PCM yang akan dipakai untuk percobaan
5.	Coolbox		Digunakan untuk tempat menyimpan wadah PCM pada saat percobaan
6.	Cold Storage		Digunakan untuk mendinginkan PCM pada saat percobaan
7.	Thermocouple		Digunakan untuk mengukur temperatur pada percobaan
8.	Data logger		Digunakan untuk mengambil data temperatur yang diukur dengan thermocouple

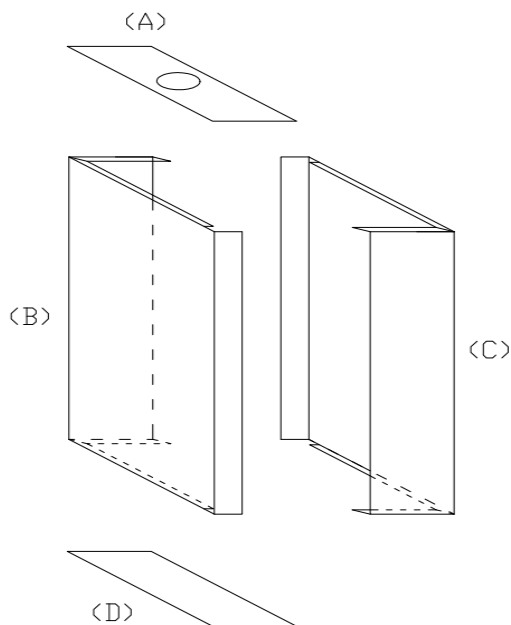
### 3.6.2. Prosedur Pembuatan Wadah PCM

1. Menyiapkan plat aluminium dan stainless 304 dengan ketebalan 1.0 mm
2. Memotong plat tersebut dengan bentuk dan dimensi seperti yang pada gambar berikut



Gambar 3.2. Desain hasil pemotongan plat

3. Melakukan bending pada plat-plat yang telah dipotong hingga memiliki bentuk seperti gambar berikut



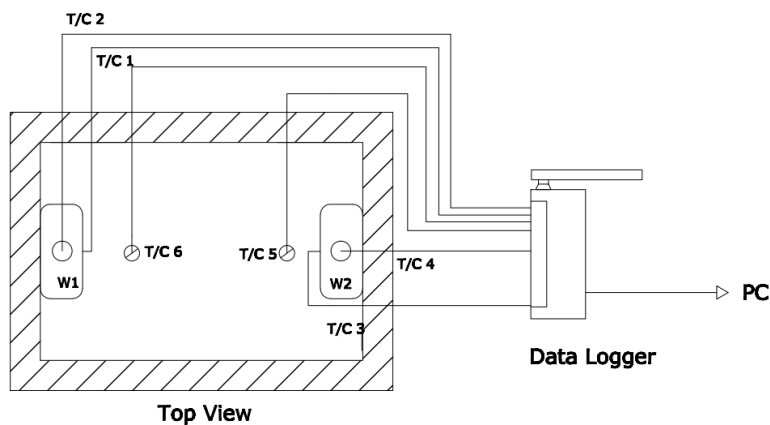
Gambar 3.3. Desain hasil bending potongan plat

4. Menyatukan potongan-potongan plat menjadi berbentuk box dan menyambungkannya dengan las

### 3.6.3. Prosedur Percobaan Wadah PCM

Berikut tahapan – tahapan yang dilakukan untuk melakukan percobaan :

1. Menyiapkan coolbox dan wadah yang sudah diisi dengan PCM
2. Menempatkan wadah ke dalam coolbox dengan posisi seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut
3. Memasang thermocouple pada beberapa titik, yakni dua thermocouple untuk di dalam dan permukaan masing – masing wadah dan dua lagi menggantung untuk mengukur temperatur udara di dalam coolbox



Gambar 3.4. Skema Aparatus Percobaan

4. Menyambungkan thermocouple dengan data logger (labjack T-7)
5. Menyambungkan data logger ke PC via USB connector
6. Memeriksa apakah semua thermocouple sudah terpasang dengan benar melalui software kipling yang sudah terinstall di PC
7. Mengoperasikan aplikasi LJlogM pada software labjack untuk melakukan monitoring terhadap perubahan temperatur yang terjadi pada titik – titik yang telah dipasang thermocouple melalui PC
8. Memasukkan coolbox ke dalam cold storage untuk melakukan proses pendinginan (charging) sampai temperature kerja PCM yang digunakan yakni – 7°C
9. Mengeluarkan coolbox dari cold storage ketika temperature yang diinginkan sudah tercapai, dan mengamati perubahan temperatur saat PCM bekerja menjaga temperatur di dalam coolbox
10. Mencatat hasil pengamatan yang diperoleh ketika proses charging dan cooling.

#### 3.6.4. Matrix Percobaan

Material	Freezing			Cooling		
	Temp. PCM	Temperatur permukaan wadah	Waktu untuk freezing	Temp. PCM	Temp. Permukaan wadah	Waktu untuk cooling
HDPE						
Al						
SS						

#### 3.7. Pengolahan dan Analisa Data

Data yang akan di analisa adalah lama waktu pendinginan PCM dan lama waktu kembalinya temperatur PCM ke temperatur awal setelah refrigerator dimatikan.

#### 3.8. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan akan diambil dengan mengaitkan antara permasalahan yang telah dirumuskan dengan hasil analisa dari percobaan yang telah dilakukan. Saran diberikan agar percobaan selanjutnya dapat lebih maksimal.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV

### ANALISA DATA

#### 4.1. Persiapan Sebelum Percobaan

##### 4.1.1. Alat dan Bahan untuk Percobaan

###### A. *Cool Box*

*Cool box* merupakan tempat untuk makanan – makanan yang biasanya disimpan dalam suhu dingin. *Cool box* berfungsi untuk menjaga temperatur benda yang disimpan didalamnya agar tidak cepat berubah, oleh karena itu bahan dari *cool box* biasanya terbuat dari material yang memiliki sifat isolator.

Pada percobaan tugas akhir ini *cool box* yang digunakan terbuat dari bahan *styrofoam* dengan dimensi 0,32 m x 0,3 m x 0,24 m. Selain harganya yang terjangkau *cool box* dari bahan *styrofoam* juga mudah didapatkan.



Gambar 4.1. *Cool Box Styrofoam*

###### B. *Cold Storage*

*Cold storage* merupakan tempat untuk menyimpan produk – produk tertentu dengan tujuan untuk mempertahankan kesegaran produk – produk tersebut. *Cold storage* biasanya digunakan di perusahaan yang bergerak di bidang industri ikan/*seafood*, daging, sayur, buah, dan makanan – makanan segar lainnya.

Pada percobaan tugas akhir ini akan menggunakan *cold storage* yang ada di Laboratorium *Marine Machinery and Fluids* (MMS). Berikut spesifikasi *cold storage* yang akan digunakan.

Panjang : 2400 mm

Lebar : 1260 mm

Tinggi : 2500 mm  
 Refrigerant : R404 A  
 Compressor : Bitzer 2HC – 1.2 – 40 S  
 220 – 240 V 50 Hz  
 Displacement 6.5 m<sup>3</sup>/h, 1450 rpm  
 Evaporator : Muller MLT 013  
 Capacity 1345 watt  
 4 Coil Rows  
 1 Fan, flow rate 1224 m<sup>3</sup>/h, 240 V 50 Hz



Gambar 4.2. Cold storage

#### C. Phase Change Material (PCM)

*Phase Change Material* (PCM) merupakan material yang mampu menyerap dan menampung kalor laten dalam jumlah yang lebih besar daripada material lain pada temperatur tertentu. Pada percobaan tugas akhir ini digunakan PCM dengan kode RT – 4 yang berbahan dasar organik. Berikut spesifikasi dari PCM RT – 4 .

Product Code : RT – 4  
 Melting Area : -7 bis -3 °C (*main peak* -4)  
 Congealing Area : -4 bis -7 °C  
 Heat Storage Capacity : 180 KJ/Kg

<i>Latent Heat</i>	: 150 KJ/Kg
<i>Specific Heat Capacity</i>	: 2 KJ/Kg K
<i>Density Solid at -15°C</i>	: 0.88 Kg/l
<i>Density Liquid at 15°C</i>	: 0.76 Kg/l
<i>Heat Conductivity</i>	: 0.2 W/m K
<i>Volume Expansion</i>	: 13.63 %
<i>Flash Point</i>	: 96 °C
<i>Max Operation Temp.</i>	: 30 °C

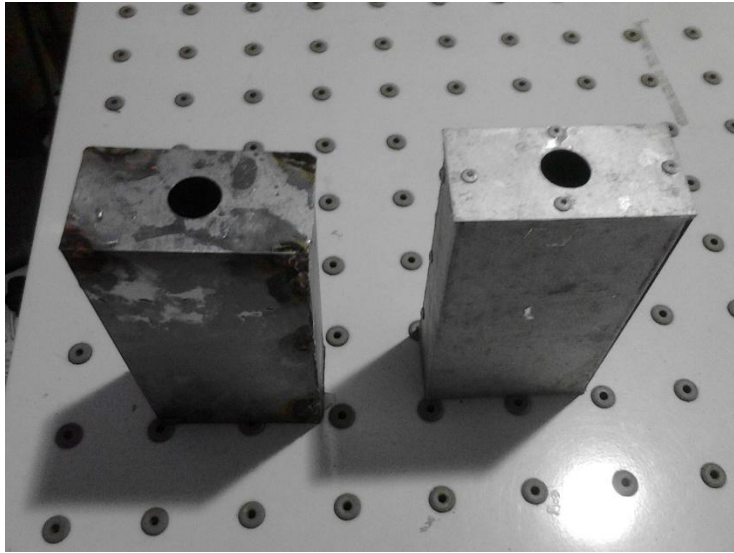


Gambar 4.3. *Phase Change Material (PCM) RT – 4*

#### D. Wadah PCM

Wadah PCM merupakan tempat untuk membungkus PCM agar tidak tumpah atau mengenai produk yang sedang disimpan di dalam *containaer* atau *cold storage*. Hal ini dikarenakan bahan dari PCM yang berbahaya apabila masuk ke dalam tubuh manusia. Wadah yang sering digunakan dewasa ini terbuat dari bahan *high density polyethylene* (HDPE). Pada percobaan tugas akhir ini akan digunakan variasi material wadah dengan menggunakan bahan logam, yakni *stainless steel* dan *Aluminium*.





Gambar 4.4. Wadah PCM

E. *Thermocouple*

*Thermocouple* merupakan alat yang dipakai untuk membaca temperatur pada sebuah objek. *Thermocouple* sering digunakan untuk alat pengukuran dan kontrol. Pada percobaan tugas akhir ini jenis *thermocouple* yang digunakan adalah *thermocouple* tipe K.



Gambar 4.5. *Thermocouple* tipe K

#### F. Data Logger

*Data logger* merupakan sebuah perangkat yang berfungsi untuk merekam atau mencatat data secara kontinyu dengan selang waktu tertentu. *Data logger* biasanya memerlukan *software* pendukung agar bisa digunakan dengan baik. Pada percobaan tugas akhir ini *data logger* yang digunakan adalah *Labjack T-7 Pro*. Berikut adalah spesifikasinya.

*Brand* : Labjack  
*Type* : T7 – Pro  
*Analog* : 14 analog  
*Range* : 10 s/d 0.001 V  
*Current Output* : 200 Ma



Gambar 4.6. *Labjack T7 – Pro*

#### G. Silicone Sealant

*Silicone sealant* merupakan sejenis bahan perekat yang terbuat dari bahan dasar *silicone*. *Silicone sealant* ini digunakan untuk menutup lubang pada *cold storage* dan celah celah kecil pada *cool box* agar tidak ada udara yang menerobos keluar.

Gambar 4.7. *Silicone Sealant*

#### H. *Sealant Tape*

*Sealant tape* pada umumnya digunakan pada sambungan pipa dan kran untuk mencegah terjadinya kebocoran air. Pada percobaan ini *sealant tape* digunakan untuk menutup celah – celah pada tutup wadah PCM agar PCM tidak tumpah dan udara dari luar tidak masuk ke dalam wadah.

Gambar 4.8. *Sealant Tape*

#### 4.1.2. Perhitungan Beban Panas Dinding Coolbox

Diketahui :

Bahan : Styrofoam

$k_{\text{styrofoam}}$  : 0.02579536 kkal/jam  $\text{m}^2$   $^{\circ}\text{C}$

$h$  : 4.303 kkal/jam  $\text{m}^2$   $^{\circ}\text{C}$

$T_1$	: 30 °C
$T_2$	: -7 °C
$\Delta x$	: 0.02 m
$\Delta t$	: 1 jam

Tabel 4.1. Dimensi Coolbox

Sisi	panjang (m)	lebar (m)	A (m <sup>2</sup> )
dinding 1	0,32	0,3	0,096
dinding 2	0,24	0,3	0,072
dinding 3	0,32	0,3	0,096
dinding 4	0,24	0,3	0,072
Alas	0,32	0,24	0,0768
Tutup	0,32	0,24	0,0768

Perhitungan beban panas melalui dinding 1 dan 3 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad \dots(4)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.02}{0.02578536} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 0.023433 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = UA\Delta t \quad \dots(5)$$

$$= 0.023433 \times 0.096 \times (30 - (-7))$$

$$= 0.08325 \text{ kkal/jam}$$

$$= 348.2411 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui dinding 1 dan 3 adalah sebesar = 2 x 348.2411

$$= 696.4822 \text{ Joule/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui dinding 2 dan 4 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.02}{0.02578536} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 0.023433 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 0.023433 \times 0.072 \times (30 - (-7)) \\ &= 0.062426 \text{ kkal/jam} \\ &= 261.1327 \text{ Joule/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui dinding 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 261.1327$

$$= 522.2654 \text{ Joule/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui alas dan tutup :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.02}{0.02578536} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 0.023433 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 0.023433 \times 0.0768 \times (30 - (-7)) \\ &= 0.066588 \text{ kkal/jam} \\ &= 278.5427 \text{ Joule/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui dinding 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 278.5427$

$$= 557.0854 \text{ Joule/jam}$$

Jadi, total laju perpindahan panas yang masuk melalui dinding-dinding coolbox sebesar :

$$q_{\text{total}} = 696.4822 + 522.2654 + 557.0854$$

$$= 1775.833 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga dalam 1 jam, energi kalor yang masuk ke dalam coolbox adalah sebesar 1775.833 Joule.

#### 4.1.3. Kalibrasi

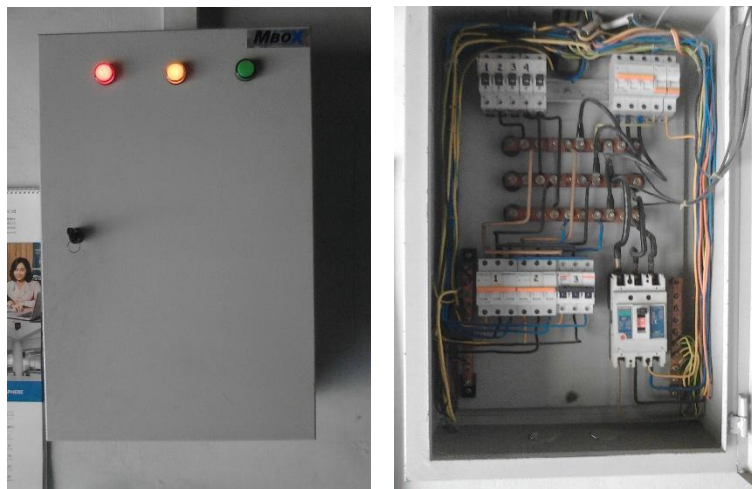
Proses kalibrasi ini dilakukan untuk menentukan kebenaran dari nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur dan bahan yang diukur dengan membandingkannya terhadap standar ukur yang mampu telusur (*traceable*) ke standar nasional maupun internasional untuk satuan ukur dan bahan – bahan acuan tersertifikasi. Sehingga melalui proses kalibrasi kita dapat mengetahui seberapa besar kesalahan atau deviasi nilai hasil pengukuran dari alat ukur yang kita gunakan.

### 4.2. Prosedur Percobaan Cold Storage

#### 4.2.1. Prosedur Pengoperasian Cold Storage

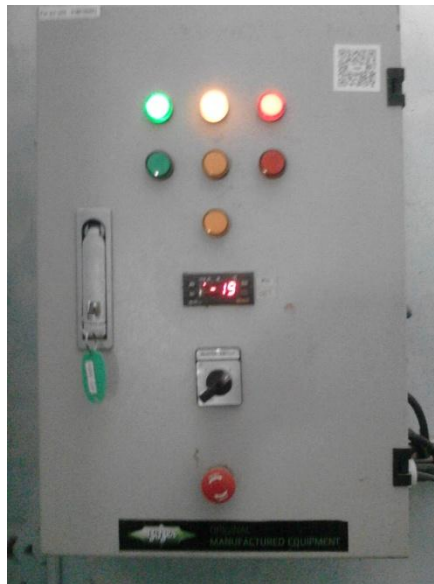
##### A. Menyalakan Cold Storage

1. Membuka kunci pada MCB 1 yang terletak di dekat pintu masuk workshop
2. Menyalakan saklar utama yang ada pada MCB 1
3. Menyalakan panel listrik untuk MCB cold storage pada MCB 1
4. Menutup dan mengunci kembali MCB 1



Gambar 4.9. MCB I *Workshop* Laboratorium MMS

5. Membuka kunci pada MCB cold storage yang ada di sebelah cold storage
6. Menyalakan semua panel yang terdapat pada MCB cold storage
7. Menyalakan saklar lampu cold storage yang berada di samping pintu cold storage
8. Menyalakan cold storage dengan cara memutar *switch* yang ada di bagian depan MCB cold storage dari posisi 1 menuju ke 2.



Gambar 4.10. MCB *Cold Storage*

## B. Mengatur Temperatur pada Cold Storage

### 1. Mengatur temperatur tujuan pendinginan

- a. Setelah cold storage menyala pastikan monitor yang berada di bagian depan MCB cold storage telah menunjukkan pembacaan temperatur di dalam cold storage
- b. Tekan tombol “SET” satu kali sampai muncul tulisan “SET” pada monitor
- c. Tekan tombol “SET” sekali lagi hingga muncul angka yang merupakan besarnya nilai dari temperatur yang ingin di tuju
- d. Atur besarnya temperatur sesuai yang diinginkan dengan menekan tombol arah ke atas untuk menambah atau tombol arah ke bawah untuk mengurangi
- e. Tekan tombol “FNC” hingga monitor menunjukkan tampilan seperti semula (tampilan pembacaan temperatur cold storage)



Gambar 4.11. Langkah Mengatur Temperatur Tujuan

## 2. Mengatur diferensial temperatur

Diferensial temperatur merupakan rentang temperatur dari temperatur tujuan yang telah diatur yang harus dijaga oleh sistem pendingin otomatis pada cold storage. Berikut langkah – langkah dalam pengaturan diferensial temperatur.

- a. Tekan dan tahan tombol “SET” pada cold storage hingga muncul tulisan “CP” pada monitor
- b. Tekan tombol “SET” sekali lagi hingga muncul tulisan “dif” pada monitor
- c. Tekan tombol “SET” lagi hingga muncul angka yang merupakan besarnya diferensial temperatur
- d. Atur besarnya diferensial temperatur yang diinginkan dengan tombol arah atas dan bawah
- e. Tekan tombol “FNC” untuk mengembalikan tampilan pada monitor seperti semula (tampilan pembacaan temperatur cold storage)



Gambar 4.12. Langkah Mengatur Diferensial Temperatur

## C. Mematikan Cold Storage

1. Memutar *switch* yang semula berada di posisi 2 kembali ke posisi 1
2. Setelah monitor pada MCB mati, matikan semua panel yang ada di dalam MCB cold storage
3. Tutup dan kunci kembali MCB cold storage
4. Mematikan saklar lampu penerangan cold storage
5. Mematikan panel listrik MCB cold storage yang ada pada MCB 1
6. Mematikan saklar utama yang terdapat pada MCB 1.



#### 4.2.2. Prosedur Konfigurasi Data Logger

*Data logger* merupakan perangkat yang dapat mengubah data analog yang dibaca oleh *thermocouple* menjadi data digital. Dengan *data logger* praktikan dapat mengukur dan mencatat data secara langsung selama percobaan. Untuk percobaan ini jenis *data logger* yang digunakan adalah *Labjack T-7 Pro*. *Data logger* ini menggunakan dua jenis software yang digunakan sebagai konfigurasi data yang akan diinput, yakni *Kipling* dan *LJLogM*. Berikut langkah – langkah dalam konfigurasi *Kipling* dan *LJLogM*.

##### A. Konfigurasi pada *Kipling*

1. Pasang *thermocouple* pada *data logger* sebanyak yang dibutuhkan.



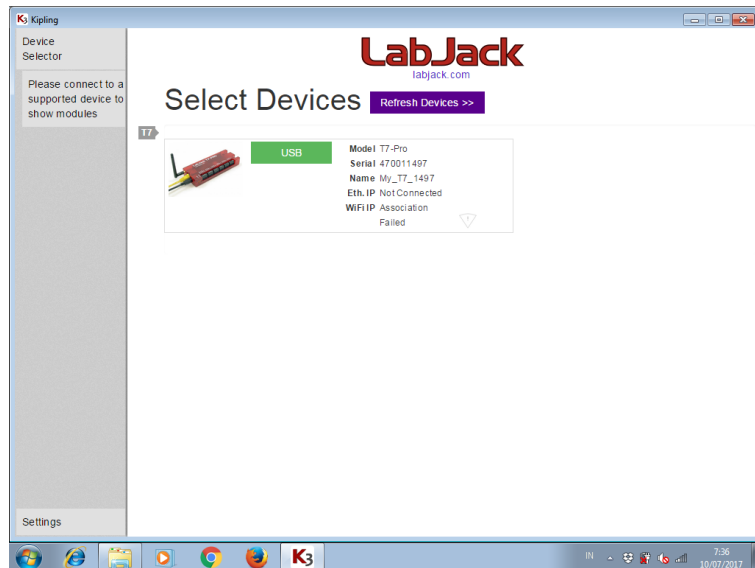
Gambar 4.13. *Thermocouple* Terpasang di *Labjack*

2. Sambungkan *data logger* ke *Laptop* dengan kabel USB

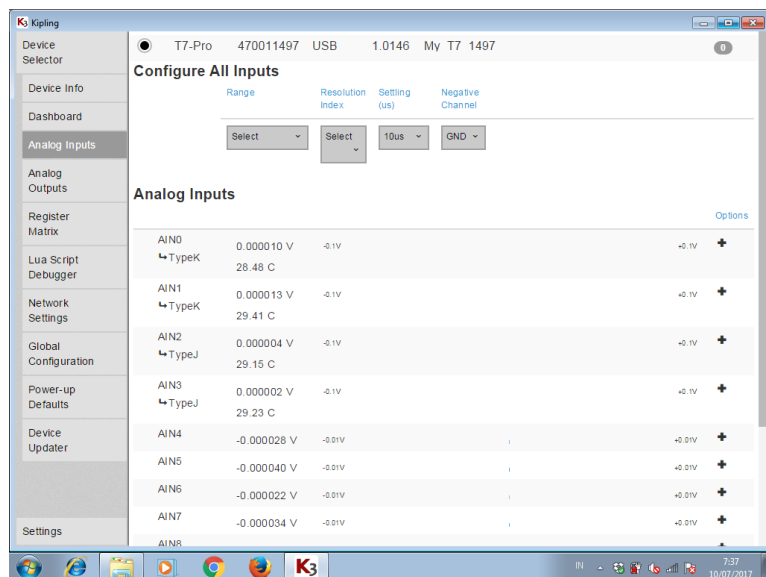


Gambar 4.14. *Labjack* Tersambung ke *Laptop*

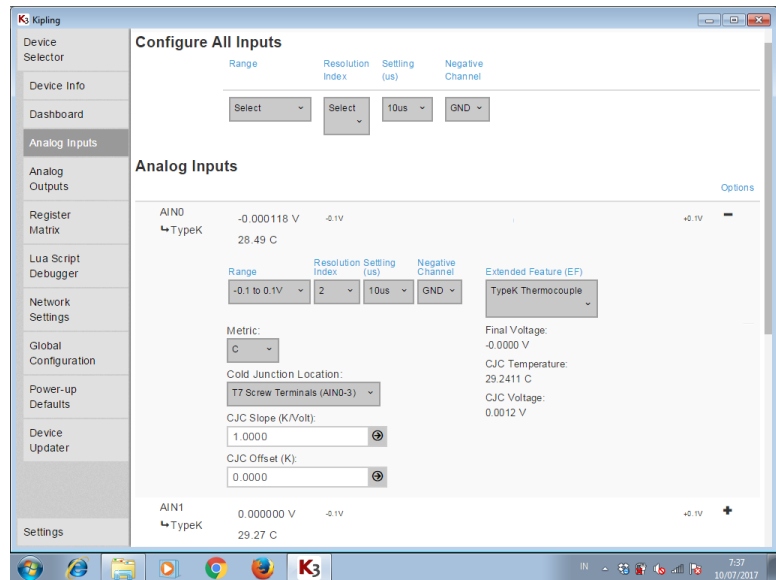
3. Buka *software Kipling* di *Laptop* dan tunggu proses *loading* selesai

Gambar 4.15. Tampilan Awal pada *Kipling*

4. Pilih jenis koneksi USB dari perangkat *Labjack T-7 Pro*
5. Lakukan konfigurasi pada menu “Analog inputs” di daftar menu yang ada di sebelah kiri

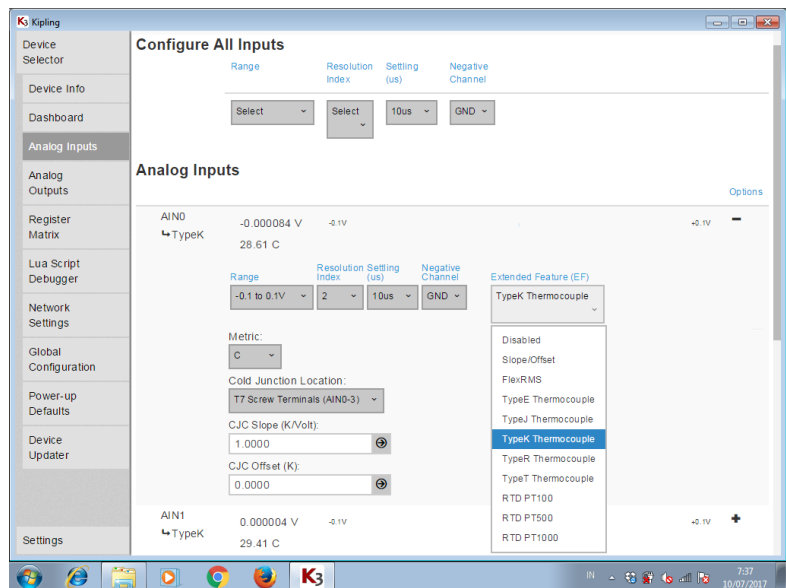
Gambar 4.16. Tampilan Menu *Analog Inputs*

6. Lakukan konfigurasi pada setiap *thermocouple* yang terpasang dengan memilih icon “+” pada setiap menu AIN untuk memunculkan lebih banyak opsi untuk konfigurasi

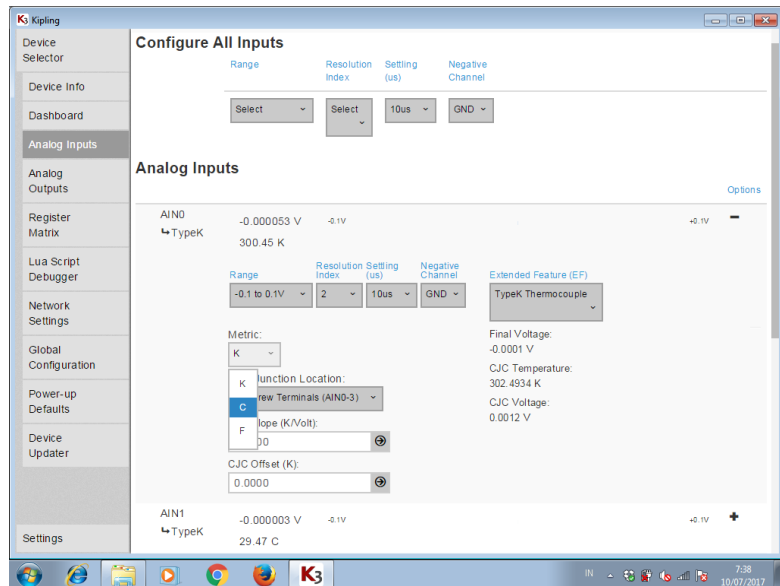


Gambar 4.17. Tampilan Opsi Konfigurasi pada Menu AIN

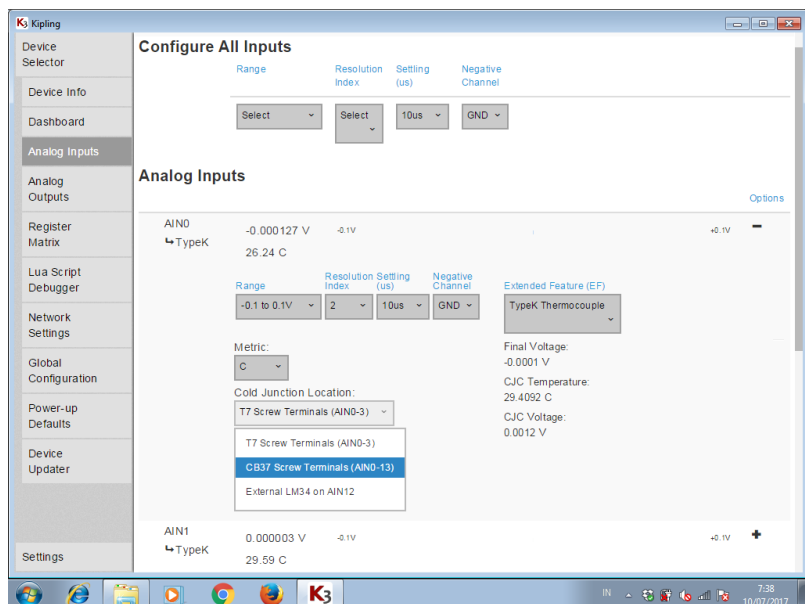
7. Pilih jenis *thermocouple* yang dipakai. Pada percobaan ini menggunakan *thermocouple* tipe K

Gambar 4.18. Pemilihan Jenis *Thermocouple*

8. Pilih satuan yang ingin digunakan dalam pembacaan temperatur pada kotak dialog "*Metric*"

Gambar 4.19. Pemilihan *Metric* Temperatur

9. Pilih jenis *cold junction location* tempat *thermocouple* dipasang. Pada percobaan ini, *thermocouple* dipasang pada *junction* tambahan jenis *CB 37 Screw Terminals (AIN 0 – AIN 13)*

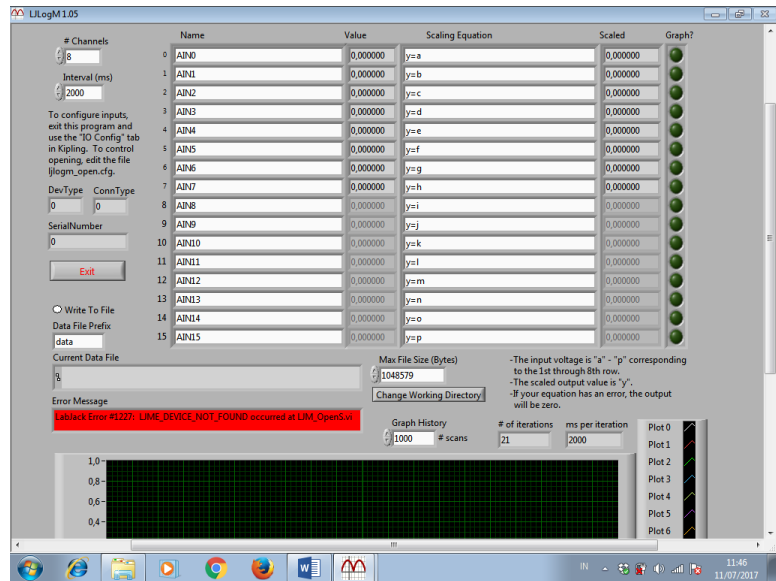
Gambar 4.20. Pemilihan *Cold Junction Location*

10. Lakukan konfigurasi tersebut pada semua *thermocouple* yang terpasang

11. Pastikan pembacaan temperatur pada setiap *thermocouple* sudah benar
12. Tutup aplikasi *Kipling* kemudian jalankan software *LJLogM*.

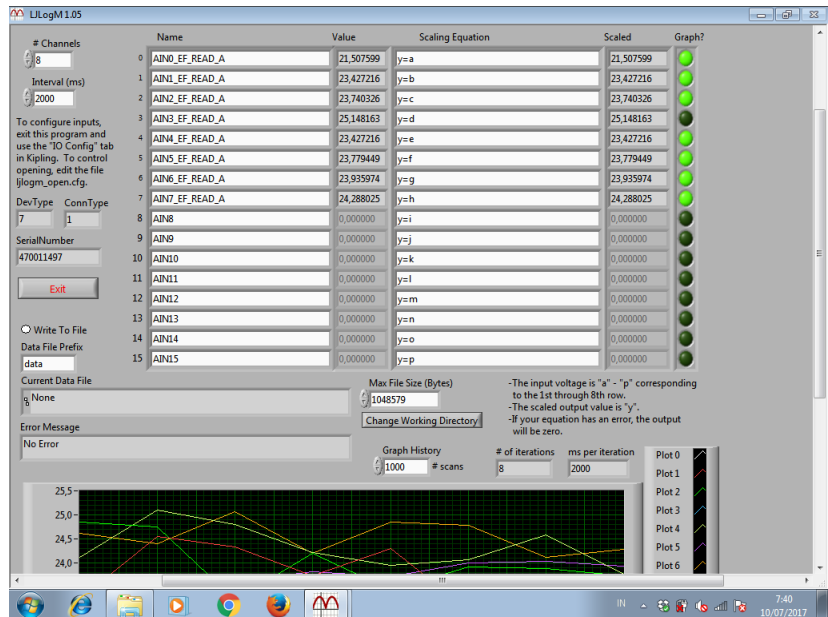
## B. Konfigurasi LJLogM

1. Jalankan software *LJLogM*



Gambar 4.21. Tampilan Awal pada *LJLogM*

2. Pastikan tidak ada error pada kotak dialog “error message”
3. Tentukan jumlah channel yang ingin direkam pada kolom “#channel”
4. Tentukan interval pembacaan data pada kolom “intervals (ms)” . Angka yang diinput pada kolom tersebut akan dibaca dalam satuan *mili sekon* (ms)
5. Pilih data hasil pembacaan yang ingin diinput ke dalam grafik dengan mengklik icon lingkarang pada kolom “Graph” hingga menyala
6. Masukkan kode *\_EF\_READ\_A* pada setiap kolom “name” agar software membaca masukan data dalam satuan temperatur
7. Pilih direktori sebagai tempat untuk menyimpan *file*
8. Dengan mengklik *write to file* data hasil pengukuran akan secara otomatis tersimpan di direktori yang telah ditentukan sebelumnya

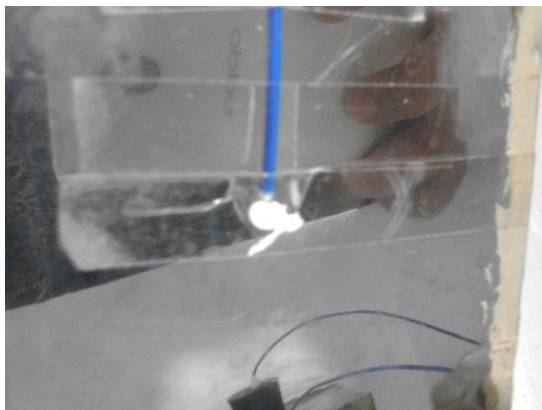


Gambar 4.22. Tampilan LJLogM Setelah Konfigurasi Selesai

#### 4.2.3. Perangkaian Aparatus

##### A. Menyiapkan Wadah PCM

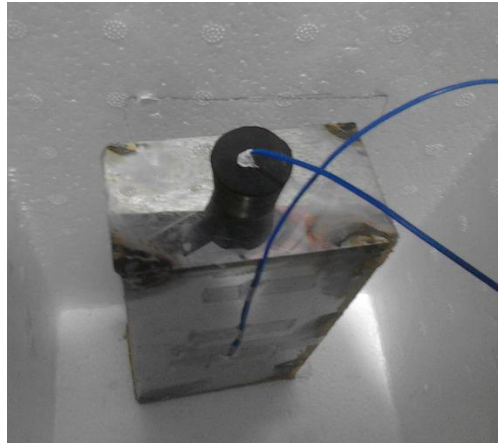
1. Memasang *thermocouple* pada wadah PCM
  - a. Posisikan ujung *thermocouple* menyentuh permukaan wadah
  - b. Tutup daerah sekitar ujung *thermocouple* dengan *thermal grease*
  - c. Tempelkan kabel *thermocouple* ke wadah dengan selotif



Gambar 4.23. Pemasangan *Thermocouple* di Permukaan Wadah PCM

## 2. Mengisi wadah dengan PCM

- a. Tuangkan PCM ke dalam gelas ukur sebanyak 0.5 liter kemudian isikan PCM tersebut ke dalam wadah masing – masing 0.5 liter
- b. Tutup wadah dengan sumbat karet
- c. Masukkan ujung *thermocouple* ke dalam wadah melalui lubang yang telah dibuat pada sumbat karet
- d. Pastikan ujung *thermocouple* tercelup ke dalam PCM



Gambar 4.24. Wadah PCM yang sudah dipasang *Thermocouple*

## B. Menyiapkan *Cool Box*

1. Memasukkan wadah ke dalam *cool box*
2. Merapikan kabel *thermocouple* dan membalutnya dengan *sealant tape*
3. Memberi *silicone sealant* pada celah – celah di lubang tempat kabel *thermocouple* pada *coolbox*.



Gambar 4.25. Persiapan *Coolbox* di Dalam *Cold Storage*

#### 4.2.4. Jenis dan Variabel Percobaan

##### A. Jenis Percobaan

Berikut beberapa jenis percobaan yang akan dilakukan pada tugas akhir ini.

1. Percobaan untuk mengetahui perubahan temperaur ketika mendinginkan 1 liter PCM di dalam dua wadah *Stainless Steel* sampai 1.5 jam dan kemampuannya mempertahankan temperatur udara di dalam *coolbox*
2. Percobaan untuk mengetahui perubahan temperaur ketika mendinginkan 1 liter PCM di dalam dua wadah *aluminium* sampai 1.5 jam dan kemampuannya mempertahankan temperatur udara di dalam *coolbox*
3. Percobaan untuk mengetahui perubahan temperaur ketika mendinginkan 1 liter PCM di dalam dua wadah HDPE sampai 1.5 jam dan kemampuannya mempertahankan temperatur udara di dalam *coolbox*.

##### B. Variabel Percobaan

Variabel yang digunakan pada percobaan ini :

##### 1. Percobaan Pertama

Variabel bebas : Bahan wadah PCM  
 Variabel terikat : Temperatur  
 Variabel kontrol : Waktu, posisi *thermocouple*

##### 2. Percobaan Kedua

Variabel bebas : Bahan wadah PCM  
 Variabel terikat : Temperatur  
 Variabel kontrol : Waktu, posisi *thermocouple*

##### 3. Percobaan Ketiga

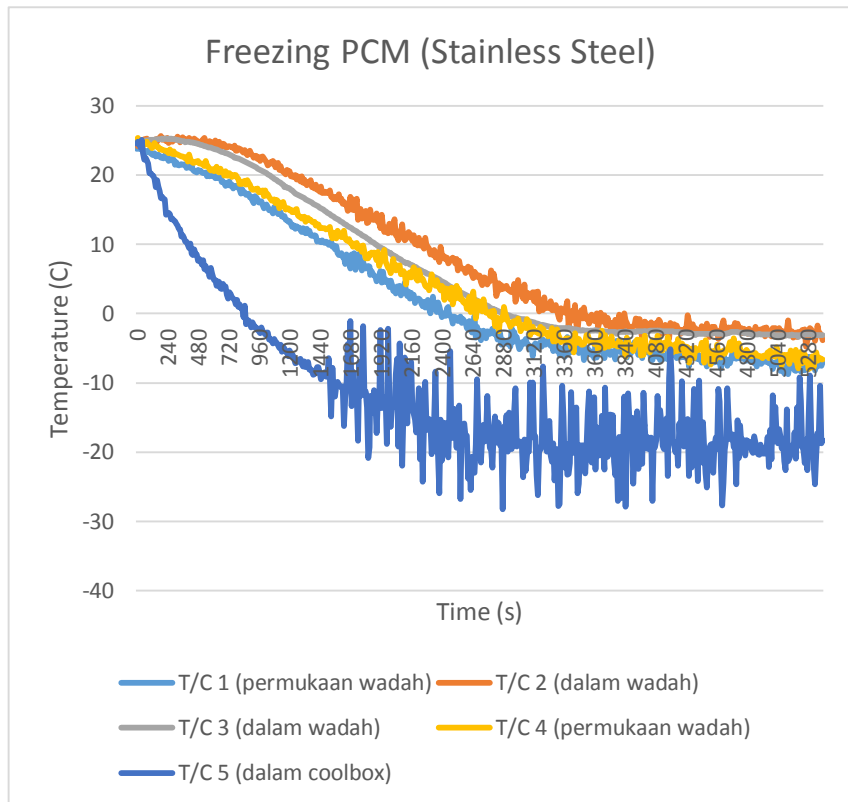
Variabel bebas : Bahan wadah PCM  
 Variabel terikat : Temperatur  
 Variabel kontrol : Waktu, posisi *thermocouple*



### 4.3. Data Hasil Percobaan dan Analisa

#### 4.3.1. Percobaan PCM dengan Wadah Stainless Steel

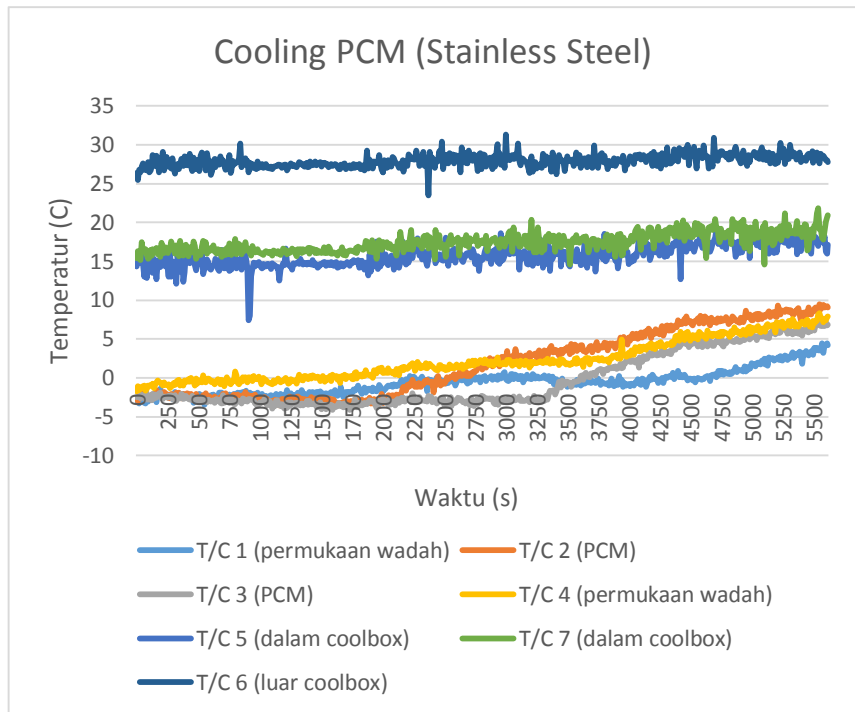
##### A. Kecepatan Pendinginan (*Freezing*)



Gambar 4.26. Grafik Pendinginan (*Freezing*) Wadah *Stainless Steel*

Grafik di atas menunjukkan perubahan temperatur pada udara, permukaan wadah *stainless steel*, dan PCM di dalam wadah yang didinginkan di dalam *cold storage* dengan temperatur pendinginan  $-20^{\circ}\text{C}$  dan temperatur diferensial  $2^{\circ}\text{C}$ . Temperatur awal udara, wadah, dan PCM adalah  $25^{\circ}\text{C}$  kemudian sampai pada temperatur  $-4^{\circ}\text{C}$  dalam waktu 1 jam 30 menit berdasarkan perhitungan dengan *stopwatch*. Apabila kita amati perubahan temperatur wadah dengan PCM dapat kita lihat perbedaannya di mana temperatur wadah turun lebih cepat daripada PCM dikarenakan konduktivitas termal *stainless steel* ( $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) lebih besar daripada konduktivitas termal PCM ( $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Selain itu, karena wadah benar – benar tertutup maka kalor dari wadah akan terserap terlebih dahulu sebelum PCM selama proses pendinginan.

## B. Kemampuan Mempertahankan Temperatur (*Cooling*)

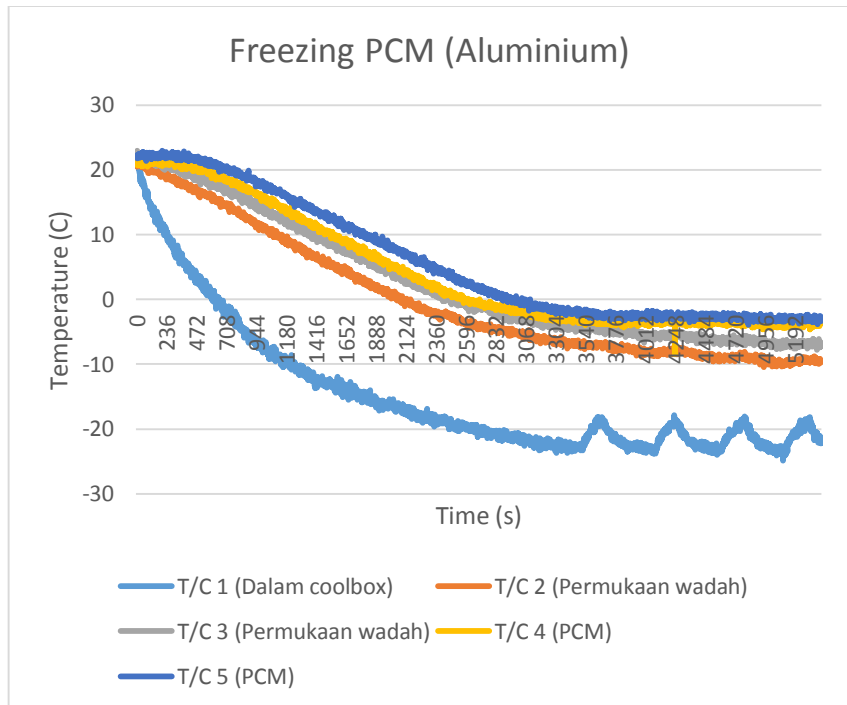


Gambar 4.27. Grafik *Cooling* PCM Wadah *Stainless Steel*

Berdasarkan grafik di atas, kita dapat mengamati kinerja PCM de dalam wadah *stainless steel* dalam mempertahankan temperatur udara di dalam *coolbox*. Temperatur awal udara di dalam *cool box* adalah 15 °C, sedangkan wadah dan PCM pada -3 °C. Setelah waktu berjalan selama 1 jam 30 menit, temperatur udara di dalam *cool box* sudah kembali naik ke 21 °C, sedangkan wadah dan PCM berturut – turut sebesar 7 °C dan 9 °C. Dari data akhir tersebut kita dapat melihat bahwa temperatur wadah masih lebih rendah daripada PCM, hal ini menunjukkan bahwa kalor yang di serap oleh wadah ditransfer ke PCM sehingga temperatur PCM lebih cepat naik meskipun konduktivitas termal PCM lebih rendah daripada material wadah.

#### 4.3.2. Percobaan PCM dengan Wadah Aluminium

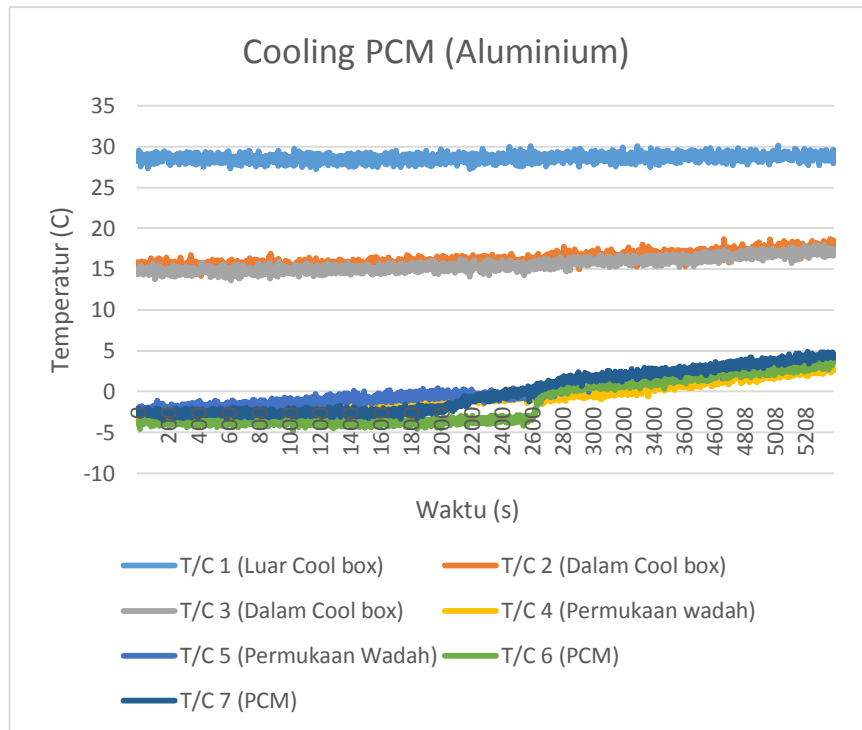
##### A. Kecepatan Pendinginan (*Freezing*)



Gambar 4.28. Grafik *Freezing* PCM Wadah Aluminium

Grafik di atas merupakan data perubahan temperatur selama proses pendinginan PCM dengan wadah aluminium. Dari grafik tersebut kita dapat bahwa temperatur awal udara, wadah, dan PCM berada di posisi 25 °C. Setelah dilakukan pendinginan PCM mencapai temperatur -4 °C dalam waktu 1 jam 30 menit. Jika dibandingkan dengan percobaan 4.3.1 sebelumnya, dapat kita lihat waktu pendinginan 38emper sama dengan sebelumnya yang menunjukkan pengaruh dari perbedaan konduktivitas termal pada wadah tidak banyak berpengaruh ketika proses *freezing*. Selanjutnya rekaman data terakhir menunjukkan temperatur udara berada pada posisi -20 °C, PCM pada -4 °C, dan wadah pada -8 °C. Perbedaan temperatur antara wadah dan PCM terlihat sama seperti pada percobaan 4.3.1, dimana wadah memiliki temperatur lebih rendah dibandingkan PCM.

## B. Kemampuan Mempertahankan Temperatur (*Cooling*)

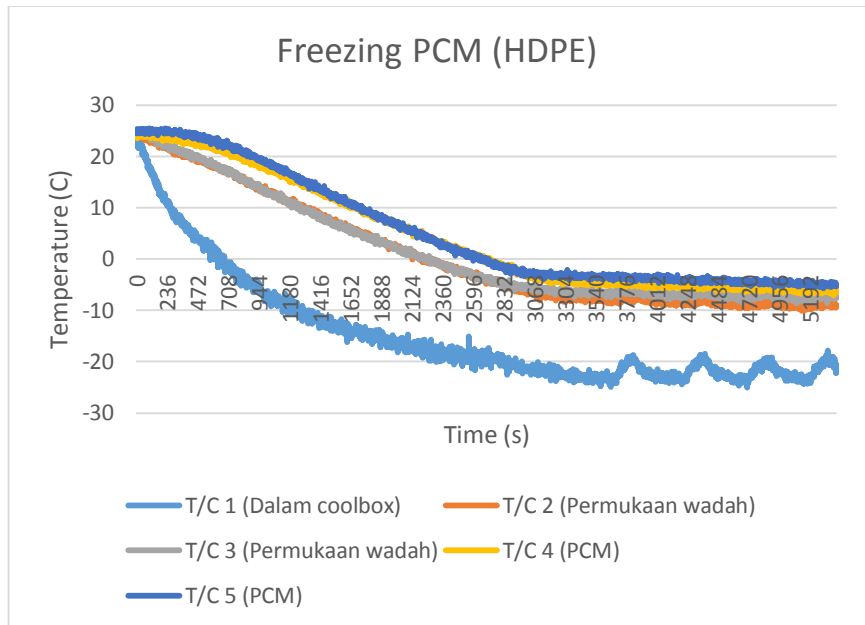


Gambar 4.29. Grafik *Cooling* PCM Wadah Aluminium

Grafik diatas merupakan data perubahan temperatur yang terjadi di dalam *coolbox* selama proses mempertahankan temperatur (*cooling*) udara di dalamnya. Dari grafik tersebut kita dapat melihat posisi temperatur awal udara di dalam *cool box* berada pada 15 °C, sedangkan PCM dan wadah berada pada -3 °C. Berbeda dengan percobaan sebelumnya dimana temperatur awal udara berada pada posisi 14 °C. Hal ini dikarenakan proses pengambilan data yang dimulai terlalu awal, sehingga data temperatur awal yang terekam lebih rendah. Namun dari grafik tersebut kita masih bisa melihat perbedaan kinerja yang sangat menonjol dalam proses *cooling*. Dalam waktu 1 jam 30 menit terhitung dengan *stopwatch*, temperatur udara di dalam *cool box* masih berada pada posisi dibawah 20 °C, tepatnya pada temperatur 18 °C. Sedangkan temperatur wadah dan PCM keduanya berada pada posisi yang hampir persis di 5 °C untuk wadah pertama dan 4 °C pada wadah kedua.

#### 4.3.3. Percobaan PCM dengan Wadah HDPE

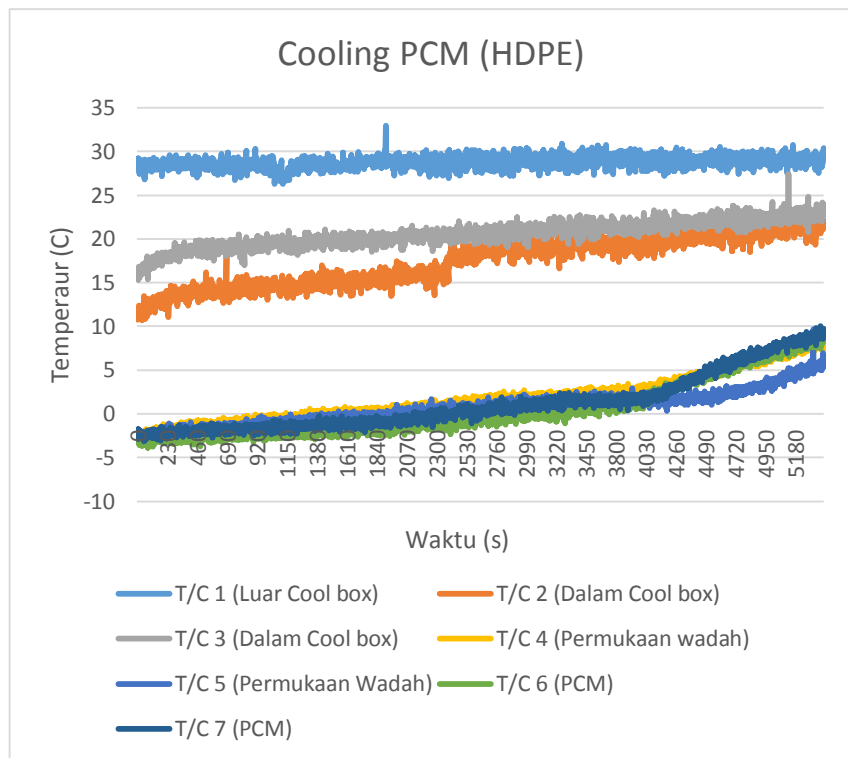
##### A. Kecepatan Pendinginan (*Freezing*)



Gambar 4.30. Grafik *Freezing* Wadah HDPE

Grafik di atas merupakan hasil data yang diperoleh selama proses pendinginan PCM dengan wadah polimer HDPE. Dari grafik tersebut kita dapat melihat posisi temperatur awal udara, PCM, dan wadah berada di titik 25 °C. Kemudian setelah dilakukan pendinginan di dalam *cold storage* selama 1 jam 30 menit. Dari kedua percobaan sebelumnya temperature tersebut merupakan perolehan yang terendah jika kita membandingkannya. Dari data akhir percobaan dapat kita lihat posisi temperatur wadah berada pada - 9 °C dan PCM pada -5 °C. Data ini terlihat sangat meragukan karena seharusnya menurut teori, dengan konduktivitas yang lebih rendah wadah HDPE lebih lama waktu pendinginannya dibandingkan dengan dua wadah yang lain yang memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi. Namun hal ini bisa saja terjadi dikarenakan permukaan wadah yang tidak rata sehingga ketebalan wadah berbeda-beda, sehingga ada sisi yang ketebalannya lebih tipis dari wadah lain sehingga kalor pada wadah dan PCM lebih cepat terserap.

## B. Kemampuan Mempertahankan Temperatur (*Cooling*)



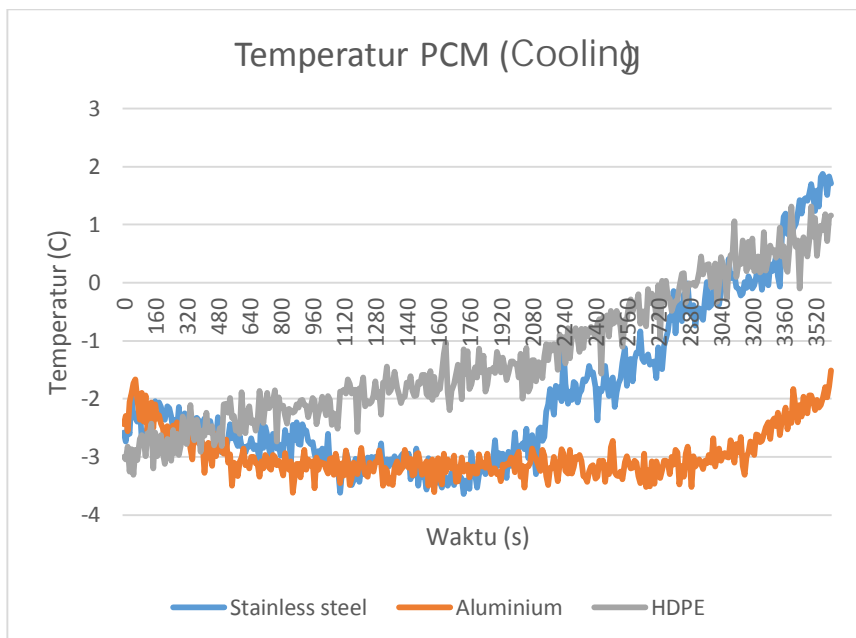
Gambar 4.31. Grafik *Cooling* Wadah HDPE

Grafik di atas merupakan hasil perolehan data pada PCM dengan wadah polimer HDPE yang digunakan untuk mempertahankan temperatur udara di dalam *cool box*. Dapat kita lihat pada grafik tersebut bahwa temperatur awal dari udara di dalam *cool box* berada pada posisi 15 °C, sedangkan wadah dan PCM pada posisi -3 °C. Antara kedua *thermocouple* yang digunakan untuk mengukur temperatur udara di dalam *coolbox*, T/C 2 dan T/C 3, terjadi ketidaksamaan hasil pengukuran pada awal percobaan, namun setelah memasuki menit ke-30, laju perubahan temperatur pada T/C 2 kembali berhimpit dengan T/C 3. Maka dapat diasumsikan bahwa kesalahan pengukuran diawal terjadi pada T/C 2. Terlepas dari kinerja pendinginan yang terlihat lebih unggul dari wadah lain berdasarkan percobaan 4.3.3. A, dari grafik di atas kita dapat melihat bahwa kinerja wadah ini dalam mempertahankan temperatur merupakan yang paling rendah dari wadah yang lain. Setelah *cool box* di keluarkan dari *cold storage*, hanya dalam waktu 1 jam 30 menit temperatur udara di dalamnya sudah naik ke posisi 24 °C. Sedangkan wadah dan PCM berada di posisi 8 °C pada rekaman data terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas wadah yang kecil nilainya akan menghambat proses penyerapan kalor dari udara ke PCM, sehingga temperatur udara lebih cepat naik.

#### 4.3.4. Analisa dan Perhitungan

##### A. Perbandingan Kinerja antar Wadah PCM

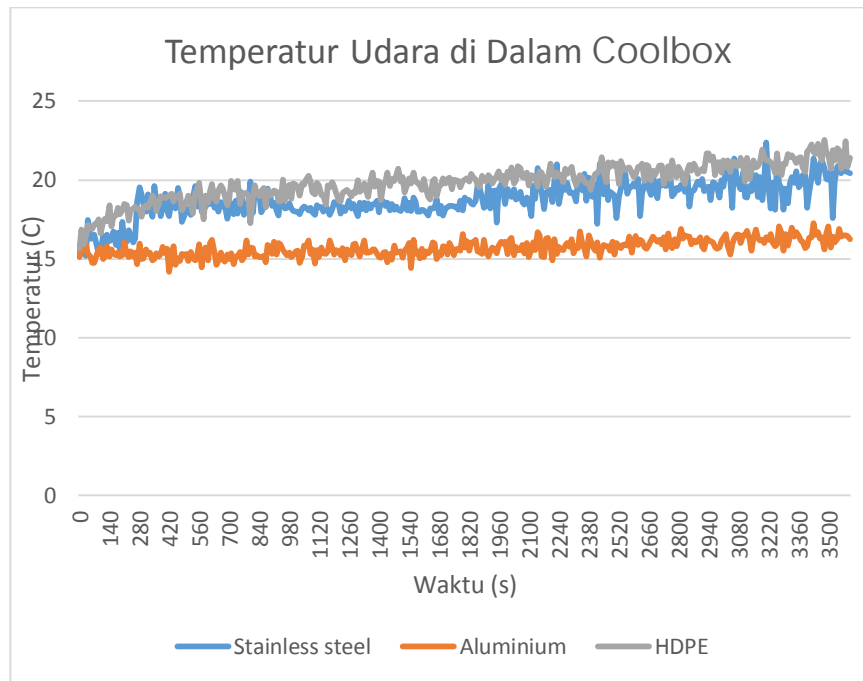
*Phase change material* pada *cold storage* maupun *reefer container* digunakan sebagai media pendingin dengan cara menyerap kalor yang dikeluarkan oleh muatan. Maka untuk membandingkan kinerja antara wadah PCM akan digunakan grafik kinerja saat PCM mempertahankan temperatur dalam percobaan dengan *cool box*. Berikut grafik perbandingan kinerja antar wadah PCM.



Gambar 4.32. Grafik Perbandingan Temperatur PCM pada Setiap Wadah

Pada Grafik di atas dapat kita amati perubahan temperatur yang terjadi pada PCM di dalam setiap jenis wadah. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa temperatur awal pada wadah HDPE lebih rendah dibandingkan dengan wadah aluminium dan *stainless steel*. Namun kenaikan temperatur yang terjadi sangat drastis jika dibandingkan dengan wadah aluminium. Begitu pula dengan wadah *stainless steel*, kedua wadah tersebut mengalami kenaikan temperatur lebih cepat dari pada wadah aluminium. Dari posisi  $-3^{\circ}\text{C}$  naik hingga mencapai temperatur  $1^{\circ}\text{C}$  (naik sebesar  $4^{\circ}\text{C}$ ) dalam waktu 3600 detik (1 jam). Sedangkan untuk wadah *stainless steel* yang dari posisi  $-3^{\circ}\text{C}$  naik hingga mencapai temperatur  $2^{\circ}\text{C}$  (naik sebesar  $5^{\circ}\text{C}$ ) dalam waktu satu jam. Sedangkan untuk wadah aluminium dengan fluktuasi temperatur terendah pada  $-3^{\circ}\text{C}$ , dalam satu jam naik ke temperatur  $-2^{\circ}\text{C}$  (naik sebesar  $2^{\circ}\text{C}$ ).

Selanjutnya, untuk mengetahui bagaimana perbedaan temperatur udara pada setiap *cool box*, bisa dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 4.33. Grafik Perbandingan Temperatur Udara di Dalam *Cool Box*

Grafik di atas merupakan grafik perbandingan perubahan temperatur udara yang terjadi di dalam *cool box* selama proses *cooling* dari percobaan pertama, kedua, dan ketiga dengan masing-masing jenis wadah yang berbeda. Dari grafik tersebut dapat kita lihat perbedaan kenaikan temperatur yang terjadi pada masing-masing *cool box*. Temperatur *cool box* yang paling cepat naik adalah pada percobaan HDPE di mana pada temperatur awal di posisi 15 °C setelah satu jam berlalu naik hingga mencapai temperatur 22 °C (naik sebesar 7 °C). Sedangkan pada percobaan *stainless steel*, kenaikan temperatur terjadi dari posisi 15 °C ke temperatur 20 °C (naik sebesar 5 °C). Kemudian pada percobaan aluminium, temperatur udara dalam *cool box* mengalami kenaikan sebesar 2 °C dari posisi temperatur 15 °C ke temperatur 17 °C. Dari hasil perbandingan tersebut dapat kita lihat bahwa pada *cool box* di percobaan aluminium mengalami proses *cooling* yang lebih sempurna daripada *cool box* pada percobaan HDPE maupun percobaan *stainless steel*.



## B. Perhitungan Kalor Masuk PCM

### 1. Wadah PCM *Stainless Steel*

Diketahui :

Bahan : *Stainless steel SS-304*

$k_{\text{stainless}}$  : 13 kkal/jam m<sup>2</sup> °C

$h$  : 4.303 kkal/jam m<sup>2</sup> °C

$\Delta T$  : 18,35 °C (diambil dari data percobaan detik ke-3600)

$\Delta x$  : 0.0012 m

Tabel 4.2. Dimensi Wadah *Stainless Steel*

Sisi	p (m)	l (m)
Sisi 1	0,09	0,17
Sisi 2	0,045	0,17
Sisi 3	0,09	0,17
Sisi 4	0,045	0,17
alas	0,09	0,045
tutup	0,09	0,045

Perhitungan beban panas melalui sisi 1 dan 3 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{13} + \frac{1}{43.03}}$$

$$U = 2.151 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = U A \Delta t$$

$$= 2.151 \times (0.009 \times 0.17) \times 18.35$$

$$= 0.604 \text{ kkal/jam}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 1 dan 3 adalah sebesar  $= 2 \times 0.604$

$$= 1.208 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui sisi 2 dan 4 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{13} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.151 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.151 \times (0.045 \times 0.17) \times 18.35 \\ &= 0.302 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar  $= 2 \times 0.302$

$$= 0.604 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui alas dan tutup :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{13} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.151 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.151 \times (0.09 \times 0.045) \times 18.35 \end{aligned}$$

$$= 0.16 \text{ kkal/jam}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar  $= 2 \times 0.16$

$$= 0.32 \text{ kkal/jam}$$

Jadi, total laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi-sisi wadah sebesar :

$$q_{\text{total}} = 1.208 + 0.604 + 0.32$$

$$= 2.22 \text{ kkal/jam}$$

## 2. Wadah PCM *Aluminium*

Diketahui :

Bahan : *Aluminium*

$k_{\text{stainless}}$  : 203.96 kkal/jam m<sup>2</sup> °C

$h$  : 4.303 kkal/jam m<sup>2</sup> °C

$\Delta T$  : 17.66 °C (diambil dari data percobaan detik ke-3600)

$\Delta x$  : 0.0012 m

Tabel 4.3. Dimensi Wadah *Aluminium*

Sisi	p (m)	l (m)
Sisi 1	0,09	0,17
Sisi 2	0,045	0,17
Sisi 3	0,09	0,17
Sisi 4	0,045	0,17
alas	0,09	0,045
tutup	0,09	0,045

Perhitungan beban panas melalui sisi 1 dan 3 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{203.96} + \frac{1}{43.03}}$$

$$U = 2.1515 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.1515 \times (0.009 \times 0.17) \times 17.66 \\ &= 0.581 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 1 dan 3 adalah sebesar = 2 x 0.581

$$= 1.162 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui sisi 2 dan 4 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{203.96} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.1515 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.1515 \times (0.045 \times 0.17) \times 17.66 \\ &= 0.291 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 0.291$

$$= 0.582 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui alas dan tutup :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{203.96} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.1515 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = UA\Delta t$$

$$= 2.1515 \times (0.09 \times 0.045) \times 17.66$$

$$= 0.154 \text{ kkal/jam}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 0.154$

$$= 0.308 \text{ kkal/jam}$$

Jadi, total laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi-sisi wadah sebesar :

$$q_{\text{total}} = 1.162 + 0.582 + 0.308$$

$$= 2.062 \text{ kkal/jam}$$

### 3. Wadah PCM HDPE

Diketahui :

Bahan : *High Density Polyethylene* (HDPE)

$k_{\text{stainless}}$  :  $0.14 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$h$  :  $4.303 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\Delta T$  :  $21.28 \text{ } ^\circ\text{C}$  (diambil dari data percobaan detik ke-3600)

$$\Delta x : 0.0012 \text{ m}$$

Tabel 4.4. Dimensi Wadah HDPE

Sisi	p (m)	l (m)
Sisi 1	0,09	0,17
Sisi 2	0,045	0,17
Sisi 3	0,09	0,17
Sisi 4	0,045	0,17
alas	0,09	0,045
tutup	0,09	0,045

Perhitungan beban panas melalui sisi 1 dan 3 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{0.14} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.112 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = UA\Delta t$$

$$= 2.112 \times (0.009 \times 0.17) \times 21.28$$

$$= 0.688 \text{ kkal/jam}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 1 dan 3 adalah sebesar  $= 2 \times 0.688$

$$= 1.376 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui sisi 2 dan 4 :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{0.14} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.112 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.112 \times (0.045 \times 0.17) \times 21.28 \\ &= 0.344 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 0.344$

$$= 0.688 \text{ kkal/jam}$$

Perhitungan beban panas melalui alas dan tutup :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4.303} + \frac{0.0012}{13} + \frac{1}{4.303}}$$

$$U = 2.112 \text{ kkal/jam m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} q &= UA\Delta t \\ &= 2.112 \times (0.09 \times 0.045) \times 21.28 \\ &= 0.182 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga, laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi 2 dan 4 sebesar =  $2 \times 0.182$

$$= 0.364 \text{ kkal/jam}$$

Jadi, total laju perpindahan panas yang masuk melalui sisi-sisi wadah sebesar :

$$\begin{aligned} q_{\text{total}} &= 1.376 + 0.688 + 0.364 \\ &= 2.428 \text{ kkal/jam} \end{aligned}$$

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.8. Kesimpulan

Dari hasil percobaan dan analisa yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Wadah dengan bahan logam memiliki kinerja lebih baik saat mempertahankan temperatur udara di dalam *coolbox* dibandingkan dengan polimer dengan selisih kenaikan temperature sebesar 2 °C terhadap *stainless steel* dan 5 °C terhadap aluminium, namun pada saat pendinginan polimer lebih unggul dengan waktu pendinginan PCM yang lebih cepat dengan selisih temperature 2 °C lebih rendah dalam waktu pendinginan yang sama.
2. Dalam hal kinerja untuk mempertahankan temperatur udara di dalam *cool box*, PCM dengan wadah aluminium memiliki kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan *stainless steel* dan polimer HDPE dibuktikan pada grafik perbandingan temperature udara dalam cool box pada setiap percobaan, kenaikan temperature terjadi sebesar 2 °C pada aluminium sedangkan *stainless steel* dan HDPE berturut-turut sebesar 5 °C dan 7 °C
3. Aluminium dan *stainless steel* dapat di jadikan sebagai opsi untuk aplikasi PCM pada lingkungan yang ekstrim seperti *reefer container* di kapal dengan kinerja yang lebih unggul untuk *cooling* dibandingkan dengan polimer HDPE.

#### 5.9. Saran

1. Penelitian ini tidak memperhitungkan *cost* dalam menentukan material, sehingga apabila benar – benar diaplikasikan kemungkinan *cost* untuk produksi cukup besar
2. Penelitian ini masih berfokus pada material logam murni saja, untuk selanjutnya bisa dilakukan untuk logam campuran sejenis kaleng makanan yang lebih aman untuk aplikasi pada muatan – muatan kontainer berupa makanan
3. Pembuatan *prototype* wadah masih menggunakan cara yang konvensional dikarenakan dana yang masih terbatas sehingga masih belum layak untuk diaplikasikan secara *real*.
4. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan penelitian terhadap kekuatan wadah PCM berbahan logam aluminium dan *stainless steel* untuk bisa digunakan di *reefer container*.



*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Yunus. 2003. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Boston : McGraw-Hill.
- David R. Lide, ed. 2005. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton : CRC Press.
- Galitseyski BM. 20. *Fundamentals of the Heat Transfer Theory*. Russia : Moskow Aviation Institute.
- Hasenohrl, Thomas. 2009. *An Introduction to Phase Change Materials as Heat Storage Mediums*. Sweden : Lund University.
- Holman, J.P. 1997. *Pepindahan Kalor*. Jakarta : Erlangga.
- Leducq, D., et al. 2014. *Phase Change Material for the Thermal Protection of Ice Cream During Storage and Transportation*. Refrigeration Process Engineering. France : Irtae.
- Maria C. Browne, dkk. 2016. *Investigation of the corrosive properties of phase change materials in contact with metals and plastic*. Dublin : University of Dublin
- Sharma et all.2009. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. India : Devi Ahilya University.
- Yuli S. Indartono, dkk. 2010. *Thermal Characteristics Evaluation of Vegetables Oil to be Used as Phase Change Material in Air Conditioning System*. Indonesia : Institut Teknologi Bandung.
- <https://beopt.nrel.gov/sites/beopt.nrel.gov/> "Phase Change Material"
- <http://www.truckinginfo.com/article/story/2006/05/hybrid-reefer-offers-big-savings.aspx>

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## **LAMPIRAN**

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## Lampiran 1

### Data Hasil Percobaan

#### 1. Percobaan *Freezing* Wadah *Stainless Steel*

Waktu (menit)	Temperatur Permukaan wadah 1 (°C)	Temperatur Permukaan wadah 2 (°C)	Temperatur PCM Wadah 1 (°C)	Temperatur PCM Wadah 2 (°C)	Temperatur Udara (°C)
0	23.835968	25.15817	24.500946	24.759003	24.579163
5	21.494293	22.983276	25.213043	25.178986	12.949188
10	19.857635	20.878082	24.207794	23.861908	5.178711
15	16.844513	18.103394	23.047607	21.552429	-2.027649
20	13.346893	14.963715	20.555969	18.053986	-5.351654
25	10.274719	12.289368	17.491913	14.613739	-9.147705
30	6.539429	8.003571	14.843842	11.014587	-11.614258
35	2.968536	6.128662	10.993469	7.46817	-14.187317
40	-0.534424	2.286621	8.541229	4.70163	-16.335266
45	-2.430725	1.665588	5.546173	1.698517	-18.534927
50	-4.475006	-0.71018	4.844177	-0.661346	-20.155579
55	-4.577789	-4.022125	1.211304	-2.034454	-20.997162
60	-6.473297	-4.376129	-1.050629	-2.420532	-17.673126
65	-5.319183	-4.626617	-1.977997	-2.616394	-20.633911
70	-6.264069	-4.376587	-1.370239	-2.586914	-19.172592
75	-6.23465	-5.387024	-2.292877	-2.886444	-20.290268
80	-6.78717	-5.212433	-2.319702	-2.853119	-18.24823
85	-8.621002	-6.515137	-3.21225	-3.13443	-20.453064
90	-6.979919	-6.608337	-3.867065	-3.119446	-18.238586

2. Percobaan *Cooling Wadah Stainless Steel*

Waktu (menit)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. PCM Wadah 1 (°C)	Temp. PCM Wadah 2 (°C)	Temp. Udara Dalam Coolbox (°C)	Temp. Udara Luar (°C)
0	-2.976532	-1.695618	-2.69595	-2.45559	15.43735	26.36438
5	-2.060028	-0.62326	-2.26007	-2.62799	16.44705	26.93573
10	-2.259399	-0.463379	-2.61978	-3.02059	16.76187	26.1198
15	-2.492035	-0.575256	-2.53210	-3.05313	16.37656	27.91501
20	-2.224213	-0.189728	-2.86505	-3.98913	16.5289	27.4053
25	-2.271179	-0.276184	-2.99231	-3.99612	16.05069	27.1969
30	-0.98996	0.361298	-3.39056	-3.67166	16.87842	27.0832
35	-0.905365	0.445312	-3.01696	-3.57882	16.68692	27.7558
40	-0.62149	1.519379	-0.50207	-3.09970	16.92004	28.3746
45	0.120911	2.108154	0.596008	-3.31317	16.82895	29.2231
50	-0.196564	1.712158	2.50415	-2.86434	17.97452	28.10513
55	0.000793	1.933441	3.161041	-2.76065	17.44827	28.8653
60	-0.829559	1.946106	3.728119	-0.30450	17.42157	28.6764
65	-0.419983	2.987061	4.45224	1.125885	17.68827	27.5616
70	0.173859	3.84903	5.717407	3.024872	16.6006	29.0737
75	-0.081055	4.750122	7.330597	4.361664	18.12033	29.6000
80	0.571991	5.727112	7.587311	4.658142	18.22531	28.8044
85	2.496613	6.376923	8.006866	5.506012	19.49588	29.0994
90	2.817932	7.101318	7.449982	6.262665	19.26526	27.78415

### 3. Percobaan *Freezing* Wadah Aluminium

Waktu (menit)	Temperatur Permukaan wadah 1 (°C)	Temperatur Permukaan wadah 2 (°C)	Temperatur PCM Wadah 1 (°C)	Temperatur PCM Wadah 2 (°C)	Temperatur Udara (°C)
0	21.07248	22.248596	20.837097	22.052643	21.51123
5	18.884216	20.580139	21.122009	21.945404	6.936523
10	15.904419	18.18689	19.051605	21.053741	-0.307556
15	18.550964	12.641968	15.047943	16.741577	-5.298279
20	9.303619	11.556244	13.45105	15.658783	-9.617523
25	5.527618	8.891174	10.282349	13.513031	-13.581329
30	2.604828	5.891327	7.474457	9.768494	-14.890869
35	-0.0336	2.936279	5.114166	6.65802	-16.639374
40	-2.595184	0.513092	0.98822	4.386322	-18.374573
45	-4.075623	-0.959595	-0.553772	1.539703	-20.837662
50	-5.243683	-3.112122	-1.918182	-0.474579	-20.631424
55	-6.058289	-3.890167	-2.846527	-1.446259	-22.54335
60	-7.504028	-4.636902	-3.423187	-1.740845	-19.975784
65	-8.005371	-4.611755	-3.927856	-2.450928	-22.514923
70	-7.997772	-5.006989	-3.759583	-2.643646	-20.148682
75	-8.418213	-5.901703	-3.686584	-2.563385	-22.680634
80	-9.282898	-7.101288	-3.553223	-2.550537	-18.938843
85	-9.723877	-7.282501	-3.263245	-3.138397	-22.661255
90	-9.75116	-6.79126	-3.734894	-3.05246	-22.100952



4. Percobaan *Cooling* Wadah Aluminium

Waktu (menit)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. PCM Wadah 1 (°C)	Temp. PCM Wadah 2 (°C)	Temp. Udara Dalam Coolbox (°C)	Temp. Udara Luar (°C)
0	-3.194794	-2.10556	-3.63641	-2.79379	15.113647	28.685
5	-3.021729	-1.740631	-3.90502	-2.26803	15.007812	28.651
10	-2.618225	-2.017822	-3.94253	-2.38546	14.924225	29.472
15	-2.352722	-1.785217	-4.15847	-2.23266	15.303711	28.248
20	-1.902466	-0.864655	-3.81909	-2.26248	15.557556	28.500
25	-1.168396	-0.849457	-4.42205	-2.04715	15.486389	28.937
30	-0.672455	-0.274475	-3.71310	-2.50970	15.708221	28.603
35	-0.854004	-0.328949	-3.45437	-1.53216	15.08786	29.049
40	-0.614716	-0.097565	-3.25335	-0.33615	15.757935	28.933
45	-0.383118	-0.112244	-2.91470	-0.11969	16.09787	29.425
50	-0.790771	-0.074554	-0.35285	0.71752	16.142609	28.377
55	-0.638672	-0.089203	-0.08920	1.21768	16.561218	28.207
60	-0.20813	0.695831	-0.05661	1.56692	16.231781	28.629
65	-0.404236	1.346954	0.832214	1.577118	16.288666	28.873
70	0.787872	1.230865	0.589905	2.015411	17.039276	28.329
75	0.679291	2.104767	1.708771	3.087341	17.356781	29.198
80	1.775757	3.359802	2.290558	3.431549	18.09198	28.398
85	1.880066	4.09024	2.902252	3.892242	16.976105	28.618
90	2.360352	3.865173	3.231567	4.379944	17.893402	29.581

5. Percobaan *Freezing* Wadah HDPE

Waktu (menit)	Temperatur Permukaan wadah 1 (°C)	Temperatur Permukaan wadah 2 (°C)	Temperatur PCM Wadah 1 (°C)	Temperatur PCM Wadah 2 (°C)	Temperatur Udara (°C)
0	23.537445	24.703644	24.539917	24.500793	22.04184
5	20.642853	21.434753	25.26358	23.112244	7.949463
10	18.473846	18.55246	23.135101	21.300812	1.962402
15	14.416748	14.771545	20.232147	18.589783	-5.427277
20	10.916779	11.121735	16.635895	15.572601	-9.130066
25	7.536346	7.378082	11.956482	12.121857	-12.692627
30	4.761322	3.645142	9.225647	8.56073	-14.823425
35	0.881287	1.910828	5.949707	5.712189	-16.62735
40	-2.232452	-1.073914	2.653717	2.416138	-19.312195
45	-4.185394	-3.542358	0.211609	-0.463409	-18.392166
50	-6.196106	-5.671234	-2.334717	-2.815399	-21.02829
55	-7.786621	-6.128082	-2.724121	-3.116333	-22.125412
60	-7.937958	-6.473389	-3.544769	-3.338867	-23.683182
65	-7.719757	-6.222961	-3.97226	-3.84552	-21.138504
70	-8.773132	-7.225403	-3.13266	-4.400116	-23.292526
75	-8.63089	-7.131653	-5.192902	-4.394958	-23.237869
80	-9.015808	-6.713867	-5.252747	-4.575409	-20.73111
85	-9.147644	-7.558441	-5.948547	-4.698578	-23.218887
90	-9.04068	-7.621368	-6.003693	-5.237091	-21.824371

6. Percobaan *Cooling* Wadah HDPE

Waktu (menit)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. Permukaan Wadah (°C)	Temp. PCM Wadah 1 (°C)	Temp. PCM Wadah 2 (°C)	Temp. Udara Dalam Coolbox (°C)	Temp. Udara Luar (°C)
0	-2.612671	-2.853119	-2.5001	-2.6611	15.638947	28.972342
5	-1.733948	-2.366364	-2.8564	-2.7356	18.706696	29.269135
10	-0.935242	-2.293335	-2.2406	-1.6567	19.092743	28.646545
15	-0.728058	-0.847565	-2.4126	-2.4930	19.382965	28.81015
20	-0.32254	-1.039368	-1.9701	-1.7290	19.586731	27.835999
25	-0.182648	-0.892472	-2.7246	-1.6604	19.803436	28.915527
30	0.354126	-0.558929	-1.7592	-1.3501	20.492004	28.780792
35	0.478516	-0.043762	-1.0786	-0.4827	20.176178	28.506317
40	1.332336	0.691376	-1.0885	-0.1671	20.519714	30.202179
45	1.704193	1.38739	-1.3864	0.1358	21.091614	28.122223
50	1.526733	1.415405	0.1966	0.8753	21.653625	29.427734
55	1.92453	1.726532	0.0310	1.5394	21.655426	28.416992
60	2.083435	0.855896	0.7106	1.1890	21.420654	28.729126
65	2.372223	1.421814	0.6823	1.6386	21.784973	28.350952
70	3.622223	1.634766	3.0482	2.4939	22.152496	27.703064
75	4.29126	2.271667	4.8656	4.7543	21.653625	29.116302
80	6.481354	2.323914	5.8683	6.0663	22.599243	29.549591
85	6.565643	3.913055	7.1009	8.1302	22.800171	29.827026
90	7.386963	6.160065	8.7933	9.7505	23.92572	30.40094

## Lampiran 2

### Data Sheet *Phase Change Material* RT-4

#### Data sheet



### RT-4



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

#### Properties:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

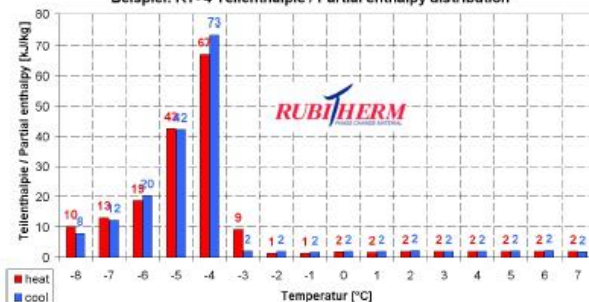
#### The most important data:

<b>Melting area</b>	<b>Typical Values</b>	
	-7 bis -3	[°C]
	main peak: -4	
<b>Congeeing area</b>	-4 bis -7	[°C]
	main peak: -4	
<b>Heat storage capacity ± 7,5%</b>	180	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat	50	[Wh/kg]*
in a temperatur range of -8 °C to 7 °C.		
<b>Specific heat capacity</b>	2	[kJ/kg·K]
<b>Density solid</b>	0,88	[kg/l]
at -15°C		
<b>Density liquid</b>	0,76	[kg/l]
at 15°C		
<b>Heat conductivity (both phases)</b>	0,2	[W/(m·K)]
<b>Volume expansion</b>	13,63	[%]
<b>Flash point (PCM)</b>	96	[°C]
<b>Max. operation temperature</b>	30	[°C]



GHS08  
H302: Harmful if swallowed  
and irritates skin/eyes.

Beispiel: RT-4 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



\*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH  
Sperenberger Str. 5a  
D-12277 Berlin  
Tel: +49 30 720004-62  
Fax: +49 30 720004-99  
E-Mail: [info@rubitherm.com](mailto:info@rubitherm.com)  
Internet: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 13.02.2015

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Bojonegoro, Jawa Timur, pada tanggal 22 Oktober 1994. Penulis merupakan anak ke dua dari tiga bersaudara. Penulis yang akrab disapa Dwi (SD), Yusuf (SMP), dan Ucup (SMA-Kuliah) telah menempuh pendidikan formal antara lain SDN Ledok-kulon II (2000-2006), SMPN 1 Bojonegoro (2006-2009), SMAN 4 Bojonegoro (2009-2012). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi. Diterima di jenjang S1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2012 melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Nasional). Selama masa perkuliahan penulis aktif

dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis aktif sebagai pengurus di lembaga dakwah selama tahun kedua dan ketiga perkuliahan. Penulis mulai berfokus pada bidang *Marine machinery and System* (MMS) pada tahun terakhir perkuliahan kemudian mengambil skripsi dalam lingkup bidang tersebut.